SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 887 - JANVIER 2021 - LA FIN DE L'UNIVERS

© ESA/NASA/PHOTOMONTAGE SETA
FLICKR RF/GETTY IMAGES

JANVIER 2021 - N° 887 - ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 6,50 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ANDORRE 5,40 € / PORTUGAL 5,70 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8.60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $
DOM 5,90 € / DOM-AVION 7,90 €

L 13418 - 887 H - F: 5,30 € - RD

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

COVID-19
LES VACCINS INNOVANTS
p. 68

LA FIN DE L'UNIVERS

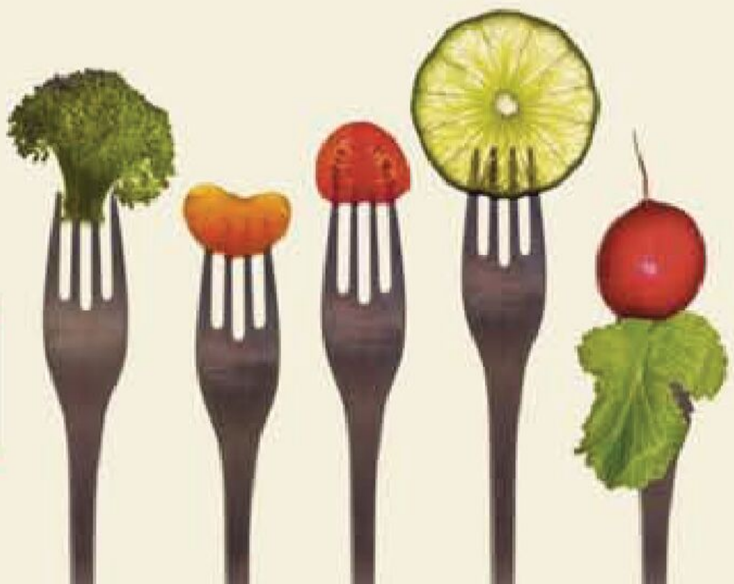
Les 5 scénarios possibles

p.28

SANTÉ

LES ALIMENTS ANTI-INFLAMMATION

p.58



Avec le Don de Giga, plus on est nombreux plus on est solidaires.

Le don de giga

Bouygues Telecom lance le Don de Giga pour lutter avec ses clients contre l'exclusion numérique. Soyez nombreux à nous soutenir, c'est grâce à vous tous que nous distribuerons des forfaits et des téléphones à ceux qui en ont besoin*. Soutenez l'opération sur **bouyguestelecom.fr/dondegiga**

En partenariat avec la Croix-Rouge française.

croix-rouge française
PARTOUT OÙ VOUS AVEZ BESOIN DE NOUS

×

bouygues TELECOM

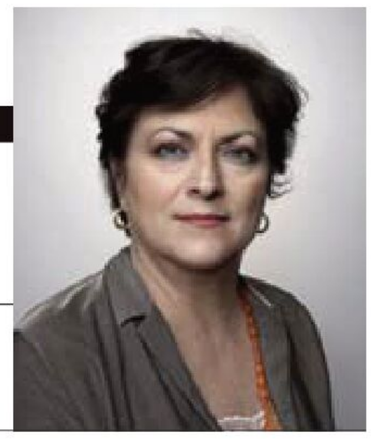
on est fait pour être ensemble

*Dans la limite de 20 000 forfaits et 10 000 smartphones.

BETC Bouygues Telecom – Société Anonyme au capital de 712 588 399,56€ – Siège social : 37-39, rue Boissière – 75116 PARIS – 397 480 930 RCS PARIS.

ÉDITO

Dominique Leglu
Directrice de la rédaction



BERNARD MARTINEZ

Le grand sommeil

C'est beau, c'est grand, c'est effrayant. Mais ô combien instructif, assurent cosmologistes et physiciens. Depuis des décennies qu'ils détaillent à qui mieux mieux le Big Bang, on commençait à se demander comment allait tourner l'histoire que ces spécialistes narrent de l'Univers, et surtout à quoi ressemblerait sa fin. Celle-ci apparaît *a priori* si obscure qu'il faut du courage intellectuel et une solide formation physico-mathématique pour s'y aventurer… Mais certains l'ont fait. *Sciences et Avenir – La Recherche* se devait donc de le relater. Rien à voir, rappelons-le d'emblée, avec les apocalypses des religions du livre, judaïsme, christianisme ou islam. Ici, on a affaire à la science la plus moderne, celle de la matière-espace-temps. À la hauteur de Shakespeare (ou presque). Son Prospero (*La Tempête*, acte IV) n'estime-t-il pas que nous, humains, *« sommes faits de l'étoffe dont sont tissés les songes, et notre petite vie est entourée de sommeil »*? On se prend à songer au grand sommeil futur de l'Univers. Ou à un sursaut inouï, avec naissance d'un jeune Univers tout neuf. Avec la science, nous, poussières d'étoiles, faisons un rêve… Grâce à l'examen attentif des interactions à l'œuvre dans le cosmos, le futur peut se révéler aux astrophysiciens, qui rameutent toutes leurs connaissances sur ce qui régit particules, galaxies et étoiles. Scrutent le cœur de certaines d'entre elles, parfois des plus étranges. Ainsi, voici ces naines noires qu'un audacieux physicien de l'Illinois (États-Unis) vient de faire surgir de ses équations *(p. 32)*. Ces étoiles encore jamais vues, aussi petites que la Terre mais aussi lourdes que le Soleil, seraient-elles une nouvelle clé vers la grande fin? Avec elles, est promis un feu d'artifice prodigieux *(p. 28)*! Le rêve va-t-il virer au thriller galactique? Rabattons-en. Ici, il s'agit d'une recherche patiente sur l'évolution des composantes les plus fondamentales, la matière, l'espace et le temps, aux multiples étrangetés non résolues. La nouvelle papesse de la fin des temps, l'astrophysicienne américaine Katie Mack, auteure de *The End of Everything* l'a clairement expliqué à notre magazine *(p. 36)*. Élaborer des scénarios du futur de l'Univers peut nous aider à mieux cerner ce que nous ne comprenons toujours pas. Ainsi, de la matière noire introuvable qui permet aux galaxies comme la nôtre de tourner sans voler en éclats sous l'effet de la force centrifuge. Ou de l'énergie noire qui pousse la matière-espace-temps à se distendre en accéléré. Va-t-elle jusqu'à rendre notre univers comme dépossédé de toute étoile? Le « ciel sombre » de Jean-Philippe Uzan *(p. 36)*. Heureusement, une bonne nouvelle pour la fin. Quel que soit le scénario, aussi théâtral soit-il, grand effondrement, grand gel ou grande déchirure *(p. 35)*, l'acte sera très lointain quand se baissera le rideau. Pouvez-vous imaginer 1 suivi de 32 000 zéros pour les trillions de trillions… d'années en vue? ■ @dominiqueleglu

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

Pour joindre la rédaction : 41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris - Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr - Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrices de la rédaction
Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
assistée de Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01 - Carole CHATELAIN (adjointe) - 01.55.35.56.57

Rédacteur(trice)s en chef
Philippe PAJOT (La Recherche) - 01.70.98.19.29
Vincent REA (hors-série) - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Olivier LASCAR (digital) - 01.55.35.56.15

Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10

Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Mathieu NOWAK (actualités - rendez-vous) - 01.55.35.56.38

Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59 - Jean-Louis GILABERT (directeur artistique) - 01.55.35.56.28
Maryvonne MARCONVILLE (directrice artistique) - 01.70.98.19.28
Thalia STANLEY (directrice artistique adjointe) - 01.55.35.56.21

Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18

Cheffe de service
Rachel MULOT (enquêtes) - 01.55.35.56.07

Chef de service adjoint
Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45

Chef(fe)s de rubrique
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33 - Sylvain GUILBAUD (fondamental) - 01.70.98.19.38 - Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54 - Bérénice ROBERT (environnement) - 01.70.98.19.34

Rédaction
Bernadette ARNAUD grande reporteure (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.44
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78 -
Arnaud DEVILLARD (numérique, data) - 01.55.35.56.27 -
Hugo JALINIÈRE (médecine, biologie) - 01.55.35.56.52 -
Sylvie ROUAT (espace, océanologie) - 01.55.35.56.40 -
Elena SENDER grande reporteure (biologie, neurosciences) - 01.55.35.56.43

Collaborateurs(trices)
Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN, Fabrice NICOT

Chroniqueurs
Aurélien ALVAREZ, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH

Ont participé à ce numéro
Pierre BERLOQUIN, Pierre KALDY, Florentin ROY, Anouk THOMAS

Secrétaire de rédaction
Frank MIETTON (1er secrétaire) - 01.55.35.56.17 - Anaëlle BRUYAND (1re secrétaire) - 01.70.98.19.35

Maquette
Horia BAHRI - 01.55.35.56.19

Photo-iconographie
Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41

Pôle digital
Marine BENOIT (fondamental, archéologie) - 01.55.35.56.23 -
Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70 -
Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24 - Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15 -
Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56-
Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41 -
Clémence BAUDOIN - responsable projets digitaux - Jessica RIOS - cheffe de projet digital

Documentation Isabelle DO O'GOMES (cheffe de service) - 01.55.35.56.49
Astrid SAINT AUGUSTE - 01.55.35.56.48

Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr

Informatique
Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06

Comptabilité - Ressources humaines
Mélanie BENKHEDIMI - 01.55.35.56.14

Fabrication Christophe PERRUSSON

Publicité MediaObs. 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris
Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com

Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGIE - 01.44.88.93.70

Abonnements et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc
60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros dont un double) : 35 €. 1 an complet (12 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.

Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Directeur de publicité
Sylvain MORTREUIL - 01.44.88.97.75

Directrice de clientèle et responsable Web
Karine GROSSMAN - 01.44.88.89.08

Assistante commerciale
Séverine LECLERC - 01.44.88.97.57

Exécution : Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05

Administration des ventes
Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20

Directeur commercial Valéry SOURIEAU

Partenariat Joëlle HEZARD - 01.58.65.09.99

Directeur des abonnements Luc BONARDI

Responsable des abonnements
Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Sciences et Avenir SAS
Président, Directeur de la publication : **Claude PERDRIEL**

Secrétaire général Jean-Claude Rossignol

Multimédia Sciences et Avenir, 41 bis, avenue Bosquet, 75007 Paris. Tél. : 01.55.35.56.00.

PEFC 10-31-3364 PEFC recyclé Ce produit est issu de sources recyclées et contrôlées. pefc-france.org

Origine du papier : Italie

Taux de fibres recyclées : 0 %

Eutrophisation : PTot = 0,017 kg/tonne de papier

Ce magazine est imprimé chez Newsprint (Lieusaint), certifié PEFC

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un catalogue « atlasformen » , un message « Mieux Vivre » et « Sophia Boutique - Atlas » sur une partie de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0620 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par Presstalis.

VOUS ÊTRE **UTILE**

Quand l'avenir est flou, on a d'autant plus besoin de faire le point sur son **épargne**.

Assurance Vie

> Ajustable à tout moment à votre situation

> Disponible en cas de besoin[1].

Et si c'était le moment d'en parler avec votre conseiller Caisse d'Epargne ?

Communication à caractère publicitaire.

(1) Sous réserve, le cas échéant, de l'accord du bénéficiaire acceptant ou du créancier garanti et selon les dispositions fiscales en vigueur.

BPCE - Société anonyme à directoire et conseil de surveillance au capital de 170 384 630 euros - Siège social : 50, avenue Pierre Mendès France - 75201 Paris Cedex 13 - RCS Paris N° 493 455 042, intermédiaire d'assurance immatriculé à l'Orias sous le N° 08 045 100.
Contrats d'assurance vie distribués par votre Caisse d'Epargne - ALTMANN + PACREAU - Crédit photo : GettyImages.

CAISSE D'EPARGNE

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche
N° 887 - Janvier 2021

DOSSIER P. 28

UNIVERS Cinq scénarios pour la fin des temps

Selon un théoricien américain, dans 10^{1100} ans, une fantastique explosion d'étoiles scellera la fin de notre Univers. Engloutissement, dislocation, contraction puis rebondissement, d'autres scénarios tentent de décrire les derniers spasmes du cosmos.

3 **Édito** par Dominique Leglu
7 **Courrier**

RÉTROSPECTIVE

8 **Ce qu'il faut retenir de 2020**

SCIENCES FONDAMENTALES

12 **ACTUALITÉS** / La quête de roches extraterrestres s'emballe / Une galaxie fossile a été découverte au cœur de la nôtre / Hyperloop a transporté ses premiers passagers
38 **Arecibo n'écoutera plus le ciel**
42 **De mystérieux flashs au-dessus des nuages**
45 **Les deux états de l'eau liquide**
46 **L'Europe s'attaque au nettoyage de l'espace**
47 **Dans les entrailles d'un volcan endormi**

NATURE

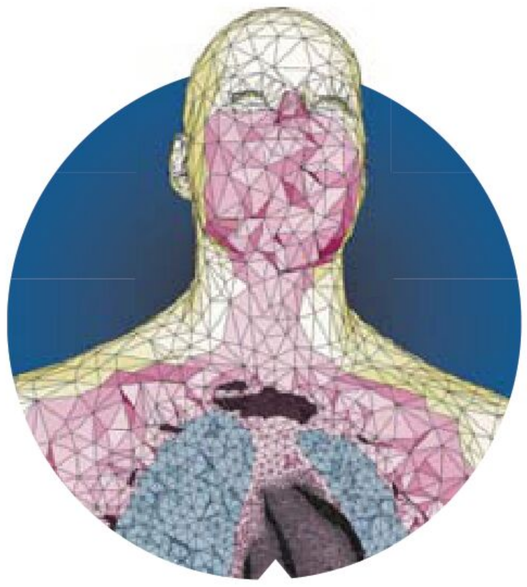
16 **ACTUALITÉS** / Le diamant mandarin mémorise 50 chants / Des alligators peuvent faire repousser leur queue / Cette plante change de couleur pour ne pas être cueillie
48 **Les vigies de la biodiversité**
52 **Le mystère des cercles de fées aiguise la curiosité**
55 **Pourquoi le danger des avalanches va croître**
57 **Avec le réchauffement, des ouragans plus puissants**

SANTÉ

20 **ACTUALITÉS** / Un traitement par oxygène inverse le vieillissement / Les végétaliens sont plus à risque de fractures / Les particules fines n'ont pas toutes la même nocivité
58 **Les bienfaits de l'assiette anti-inflammation**
64 **Sept idées reçues sur le cancer du sein**
67 **Vivre à la campagne réduit le risque d'asthme**

Les « cercles de fées » livrent leurs premiers secrets **p. 52**

Réduire l'inflammation chronique de l'organisme passe aussi par l'alimentation **p. 58**



La modélisation des organes du corps humain, un nouvel outil au service de la médecine **p. 72**

68 **Covid-19 : quatre techniques vaccinales pour contrer la pandémie**
72 **Les jumeaux numériques, nouveaux auxiliaires de santé**
75 **Des électrodes vivantes à implanter dans le cerveau**
76 **Nutrition : Les multiples atouts de l'huître**

HISTOIRE

24 **ACTUALITÉS** / Découverte d'une centaine de sarcophages égyptiens / La plus vieille bouteille d'huile d'olive / Neandertal enterrait bien les siens
80 **Le patrimoine spatial sous la loupe des archéologues**
84 **Exclusif. La Mésopotamie n'est plus le seul berceau de l'écriture**
85 **Le débat sur la bipédie de Toumaï relancé**

RENDEZ-VOUS

86 **La Recherche** Autour d'un livre
88 **Sélection livres**
90 **Expositions**
91 **Le ciel de janvier**
92 **Questions de lecteurs**
93 **La Recherche** Solution des jeux
94 **La Recherche** Dialogue sur l'art pariétal
98 **La Recherche** Jeux

La Recherche RETROUVEZ NOS CHRONIQUES

47 **Maths : Aurélien Alvarez**
57 **Climat : Christophe Cassou et Céline Guivarch**
97 **Éthique : Jean-Gabriel Ganascia**

DIDIER FLORENTZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LEE FROST/AGEFOTOSTOCK - RÉMY CORTIN POUR SCIENCES ET AVENIR- LA RECHERCHE-INRIA / M3DISIM

PUBLI
RÉDACTIONNEL

Travailler avec le cancer, une aventure collective.

Comment favoriser l'employabilité des personnes atteintes d'un cancer ? Quels sont les freins à lever ? Quelles sont les représentations attachées à la notion de vulnérabilité ? Entretien croisé entre Alice Chambre et Els Ghesquière, deux femmes engagées aux côtés des chercheurs d'emploi, quelles que soient leurs fragilités.

Alice Chambre (gauche) et Els Ghesquière (droite) lors des échanges internationaux, au siège de l'association Espaces Emploi en août 2020 pour le projet « I Know How »

Ils sont quatre. Quatre pays européens – l'Angleterre, les Pays-Bas, la Belgique, la France – à participer au projet européen I-KNOW-HOW porté à l'échelle hexagonale par le Centre Oscar Lambret et la Métropole Européenne de Lille. Un projet conçu pour accompagner l'employabilité des personnes atteintes du cancer et qui passe par la co-création de services dirigés par les utilisateurs pour les employeurs, les employés, les (para) professionnels de la santé et les coachs d'emploi. Els Ghesquière est l'une d'entre elles : elle partage son temps entre la structure belge emino qui œuvre, en lien avec les entreprises, pour le maintien et le retour à l'emploi des personnes atteintes de cancer, et l'organisme flamand Sterpunt Inclusief Ondernemen en faveur de l'entrepreneuriat inclusif, investi dans le projet européen I-KNOW-HOW. C'est dans ce cadre qu'elle a rencontré Alice Chambre, directrice de l'association Espaces Emploi Agirc-Arrco (Lille Paris Rouen Nantes Toulouse Nancy), un dispositif d'accompagnement sur mesure vers l'emploi.

Els Ghesquière : Épaulés par des ergothérapeutes , des organisations sociales et des entreprises inclusives de différents secteurs, nous accompagnons les chercheurs d'emploi et les employés atteints d'un cancer. Nous accompagnons aussi les employeurs de TPE et de PME et nous les sensibilisons à certaines représentations, pour aider à lever les freins qu'elles peuvent induire. Les personnes atteintes d'un cancer entendent encore trop souvent dans la bouche de certains d'entre eux : *« Ne pensez pas à votre travail, mais pensez plutôt à vous, à votre traitement »*... Oui, la vie change, mais elle ne s'arrête pas, elle ne se cantonne pas à la maladie. Dans notre société, on reste encore divisé : soit on est malade, soit on travaille.

Alice Chambre : En France, nous avons un système de protection sociale envié à juste titre ; en même temps les aides proposées et les dispositifs mis en place le sont selon des catégories administratives. Difficile quand on est catégorisé de se percevoir comme autonome et de se rappeler que l'on peut être actif. Dans les Espaces Emploi, nous nous adaptons à chacun pour l'accompagner au plus près de ce qu'il est, grâce à une approche interdisciplinaire incluant un psychologue et un travailleur social. Au-delà de la maladie, nous avons tous nos vulnérabilités, vulnérabilité qui n'a pas besoin d'être présentée comme une qualité permanente absolue pour être considérée comme un fait, avec ses revers mais aussi avec ses opportunités.

Els Ghesquière : Des opportunités que les employeurs ne perçoivent pas toujours. Mais nous écoutons les employeurs que nous rencontrons avec la même attention que celle que nous accordons aux personnes que nous accompagnons, pour les aider à se rendre compte qu'il y a de la place pour tout le monde dans leur entreprise. La crise sanitaire a nourri de nombreuses appréhensions. J'entends revenir chez beaucoup de personnes atteintes d'un cancer la même question : Y aura-t-il encore de la place pour moi ? Dans le même temps, cette crise a instruit certains employeurs, assignés à résidence, sur ce que l'on peut éprouver quand on se sent exclu du monde du travail. Un partage d'expérience qui peut aider à mener tous les acteurs vers la conciliation, pour participer à une performance collective au service des intérêts de chacun.

Alice Chambre : Nous ne sommes pas seuls ; la valeur de chaque individualité coexiste avec celle de la collectivité, l'une nourrit l'autre. Entre l'apologie des vulnérabilités et la vision purement financière qui les ignore, les stigmatise voire les exploite, il y a une autre vision, celle de la légitimité de chacun, avec sa contribution. Dans les Espaces Emploi Agirc-Arrco, c'est la vision que nous portons. ■

COURRIER

« Comment IA et cerveau collaborent »
(*Sciences et Avenir - La Recherche* n° 886, décembre 2020)

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

Dans votre très intéressant dossier, j'ai été un peu étonné par le titre « Conscience : sens contre capteurs ». Pourquoi opposer ainsi sens et capteurs ? La différence entre cerveau et IA, nous dit-on, réside dans le fait que le cerveau a « *connaissance de ses pensées* ». Faut-il comprendre que l'IA pense mais n'a pas la connaissance de ses pensées, ou qu'elle ne pense pas du tout ?

B. Griveau

S. et A. : Votre remarque pointe justement un aspect fondamental en matière d'intelligence artificielle : l'IA n'a pas de « sensation ». Elle ne « pense » pas non plus ni n'a « conscience » de quelque chose et surtout pas d'elle-même, du fait qu'elle existe. C'est un programme informatique, codé par des humains, et consistant à simuler, et seulement simuler, ce qui se passe chez cet être humain. Alors oui, les capteurs servent à simuler une perception (visuelle, auditive, haptique) et l'IA produit une réaction censée être la réponse à une sensation. Mais cette dernière n'existe pas.

Les bienfaits de l'agroécologie

À lire l'article « Apprendre à cultiver et à se nourrir différemment » (*S. et A.* n° 885 novembre 2020), il semblerait que l'agroécologie soit la solution pour tout à la fois réduire les émissions de GES, diminuer le gaspillage alimentaire et nourrir la population mondiale. Mais en quoi pourrait-elle diminuer le gaspillage alimentaire qui est lié à la distribution, aux habitudes de consommation et à la corruption ou aux guerres dans les pays concernés ?

Alain Bouchet

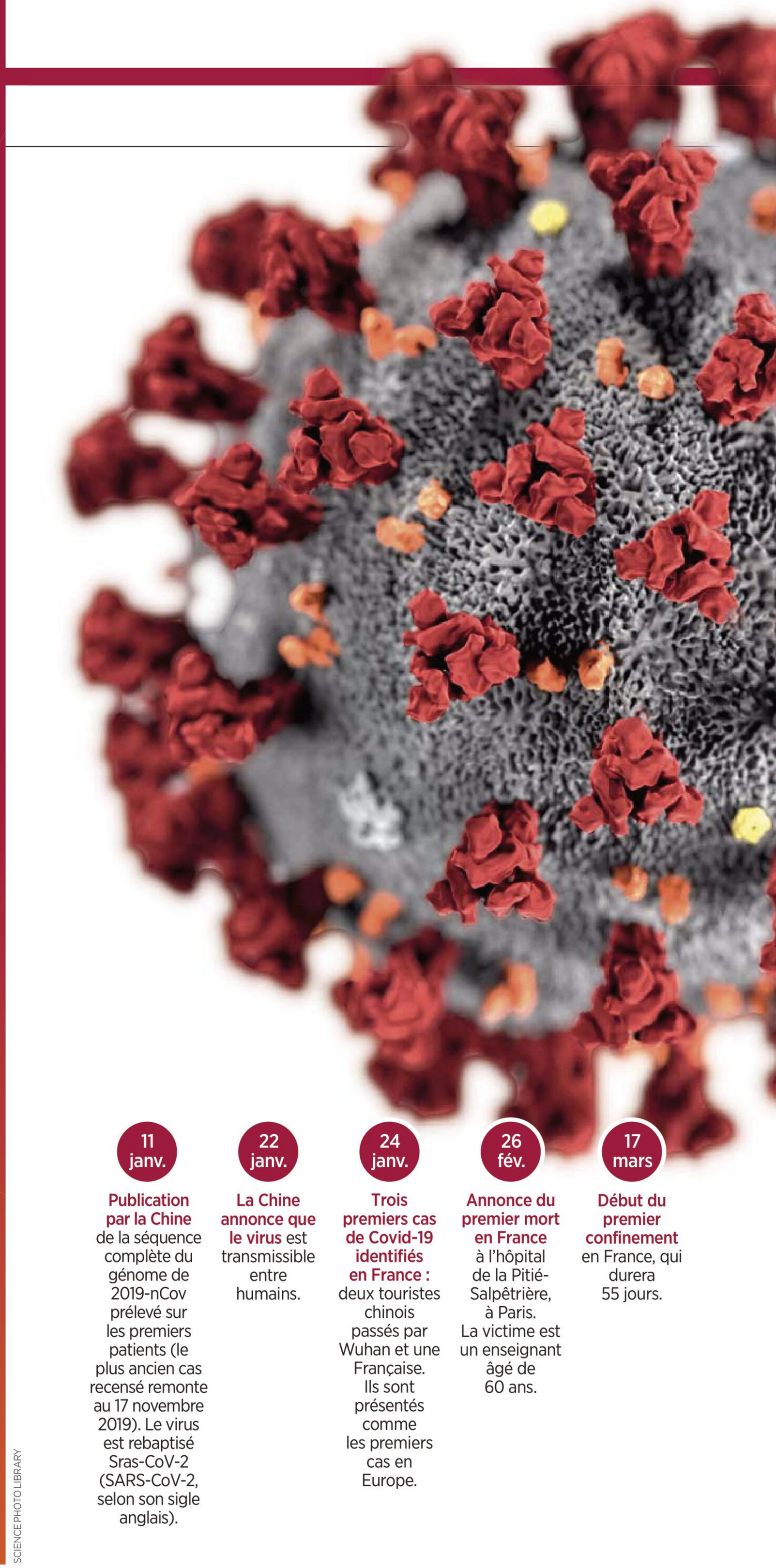
S. et A. : La transformation de l'agriculture vers un modèle plus « écologique » va de pair avec une correction profonde des modes de distribution et de consommation de la nourriture notamment pour réduire le gaspillage. Des produits plus chers pourraient ainsi amener les consommateurs à mieux les économiser. Par ailleurs « l'agriculture qui doit nourrir le monde », justifiant son intensification dans les pays développés capables d'utiliser des techniques et du matériel onéreux, est un modèle remis en question. On lui préfère aujourd'hui le développement des agricultures locales, notamment en Afrique plutôt que l'exportation par les pays riches de produits agro-industriels.

Rétrospective

CE QU'IL FAUT RETENIR DE 2020

La pandémie due au Sras-Cov-2 n'a épargné aucun continent. Elle a mobilisé les chercheurs du monde entier, ce qui a permis la mise au point en un temps record de vaccins contre le virus. Une course contre la montre et une mobilisation inédites. D'autres domaines, en espace, en environnement, en biologie, en archéologie ont eux aussi marqué de leur empreinte cette année si particulière.

DOSSIER COORDONNÉ PAR
Mathieu Nowak



SCIENCE PHOTO LIBRARY

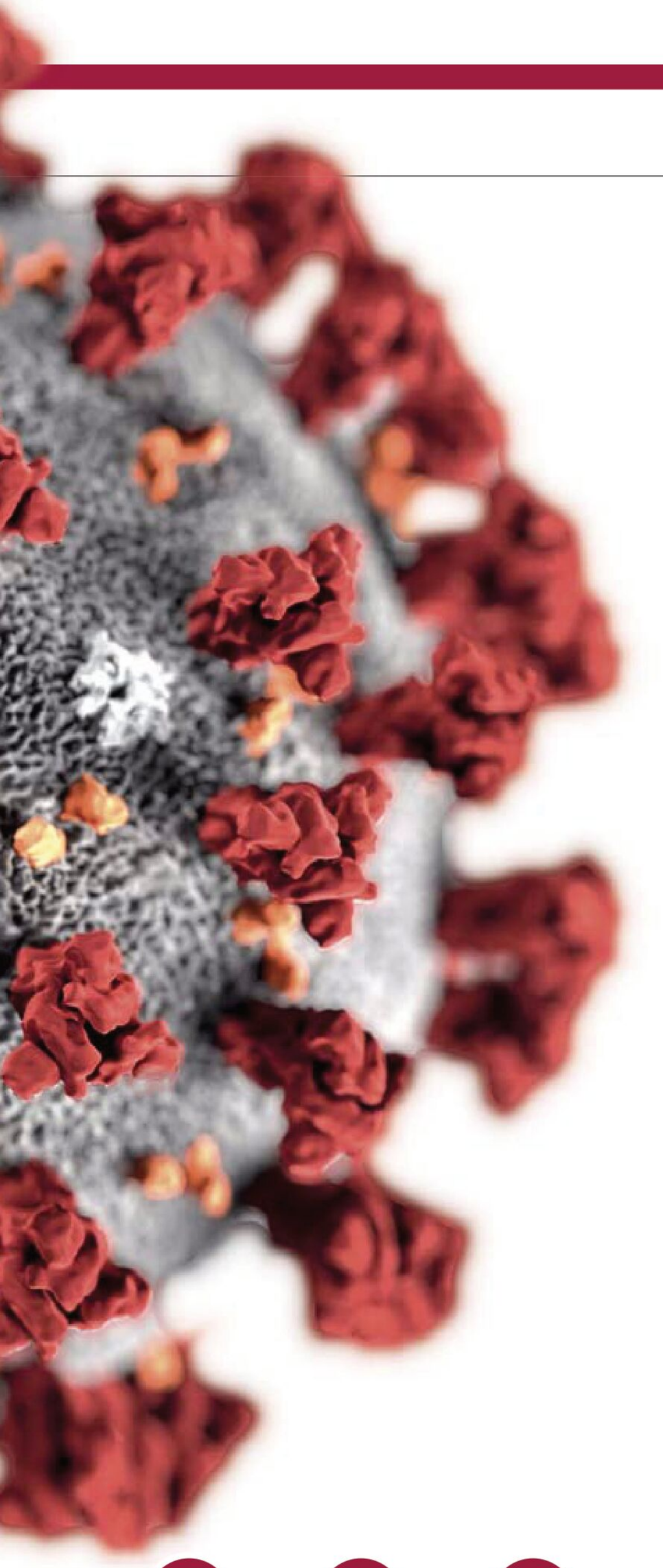
11 janv.
Publication par la Chine de la séquence complète du génome de 2019-nCov prélevé sur les premiers patients (le plus ancien cas recensé remonte au 17 novembre 2019). Le virus est rebaptisé Sras-CoV-2 (SARS-CoV-2, selon son sigle anglais).

22 janv.
La Chine annonce que le virus est transmissible entre humains.

24 janv.
Trois premiers cas de Covid-19 identifiés en France : deux touristes chinois passés par Wuhan et une Française. Ils sont présentés comme les premiers cas en Europe.

26 fév.
Annonce du premier mort en France à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris. La victime est un enseignant âgé de 60 ans.

17 mars
Début du premier confinement en France, qui durera 55 jours.



PANDÉMIE

L'ANNÉE DU COVID-19

« La maladie X », c'est ainsi que l'Organisation mondiale de la santé désignait depuis 2018 ce qu'elle considérait comme l'une des *« principales menaces sanitaires mondiales »* : l'apparition d'une maladie inconnue, provoquant une pandémie susceptible de tuer des millions de personnes en quelques mois. En octobre 2019, la maladie X avait même fait l'objet d'un vaste exercice de simulation de gestion de crise organisé par l'OMS et le centre Johns-Hopkins pour la sécurité sanitaire (États-Unis) : masques, tests, systèmes de surveillance et d'alerte épidémiologique, modélisations de la pandémie... Un mois plus tard, ce fut donc un nouveau coronavirus humain, le Sras-CoV-2, responsable de la maladie Covid-19, qui est venu mettre à l'épreuve la théorie. Et à l'exception de plusieurs pays d'Asie et d'Océanie qui ont très vite réagi (Taïwan, Corée du Sud, Viêt Nam, Nouvelle-Zélande, Japon...), personne n'était prêt. Alerte lancée trop tard par la Chine, stocks de masques vides, stratégies défaillantes, communication de santé publique erratique, etc. Seul motif de satisfaction : la réactivité de la communauté scientifique, dans les laboratoires ou auprès des patients, qui a plus appris d'un seul virus en un an que sur des dizaines d'autres ces trente dernières années. Jusqu'à développer, tester et mettre en service en quelques mois plusieurs vaccins. À ce titre, le bilan de la recherche est extraordinaire cette année sur le front des maladies infectieuses. Or il y aura d'autres « maladies X ». ■ **H. J.**

65,9 millions
de cas confirmés dont 2,257 millions en France*.

1,5 million
de personnes décédées dont 54 114 en France*.

183 vaccins
en cours de développement dont 11 en phase 3.

* AU 4 DÉCEMBRE.

23 mars — **Une étude italienne** révèle que la part des asymptomatiques (qui n'ont aucun symptôme) pourrait atteindre 75 % des cas de contaminations.

11 mai — **Fin du confinement en France.** Le pays déplore 26 643 décès depuis mars (283 000 dans le monde).

13 mai — **Premières indications** d'une faible saisonnalité du virus, brisant l'espoir d'une disparition avec l'arrivée de l'été.

28 mai — **La première preuve formelle d'une transmission du virus** avant le développement des symptômes est publiée dans le « New England Journal Of Medicine ».

18 sept. — **Israël est le premier pays à reconfiner sa population.** La France déclare un couvre-feu le 23 octobre dans 54 départements et un reconfinement le 30 octobre.

15 oct. — **Publication des résultats de l'essai clinique de l'OMS Solidarity.** Les trois traitements à base de remdesivir, hydroxychloroquine, lopinavir/ritonavir et interféron, n'ont pas d'effet sur la mortalité des personnes hospitalisées.

9 nov. — **Pfizer et BioNtech annoncent une efficacité de plus de 90 %** pour leur vaccin à ARNm. Dans la semaine qui suit, le vaccin russe à vecteur viral, Spoutnik V, est annoncé à 92 % d'efficacité et Moderna à 94,5 %.

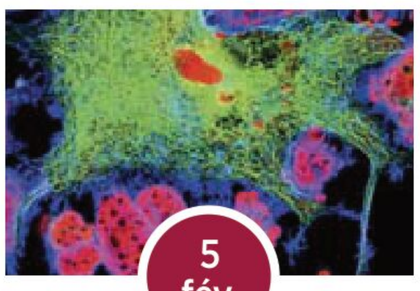
3 déc. — **Le Premier ministre Jean Castex** détaille la stratégie vaccinale française, qui prévoit le début de la vaccination dans les Ehpad en janvier 2021, avant de s'ouvrir au reste de la population, toujours de façon non obligatoire.

8 déc. — **Début des vaccinations au Royaume-Uni** avec le vaccin de Pfizer et BioNTech. **Dernière heure :** Sanofi et GSK annoncent que leur vaccin ne sera prêt qu'à la fin de 2021. Contrairement à ce que nous avons écrit p. 71, les essais de phase 3 ne commenceront pas fin 2020.

Lire aussi p. 68

SCIENCES

LES AUTRES ÉVÉNEMENTS QUI ONT MARQUÉ L'ANNÉE 2020



PHANIE

5 fév.

LES MUTATIONS PRÉDICTIVES D'UN CANCER SE DÉVOILENT

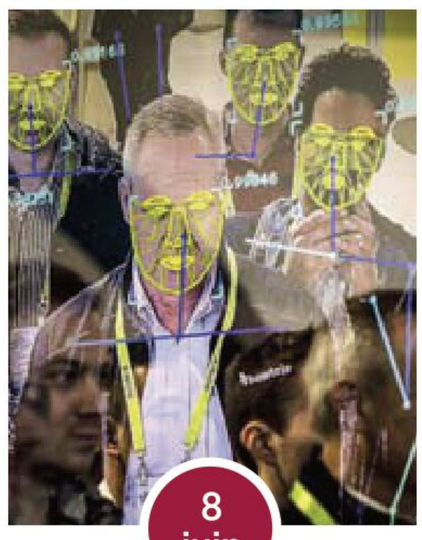
Identifier dans des tissus sains, des dizaines d'années avant l'apparition d'un cancer, des mutations spécifiques (signatures mutationnelles) prédictives de son apparition. Voilà l'espoir permis par une série de 23 articles parus dans la revue *Nature* : ils dévoilent les données de cartographie génomique de 38 types de cancers reposant sur l'analyse du génome complet de 2600 tumeurs. Jusqu'ici, seul 1 % de l'information génétique des tumeurs était exploré. Ces résultats ont été obtenus par le Pan Cancer Project qui réunit deux grands consortiums américain et européen de plus de 1300 chercheurs dans 37 pays. **H. J.**
(S. et A. *n° 877)*

SIPA

31 mai

CREW DRAGON S'ARRIME À L'ISS

Pour la première fois depuis 2011 et le retrait des navettes spatiales, un vaisseau américain a transporté sans encombre un équipage jusqu'à la Station spatiale internationale. Il s'agit de la capsule Crew Dragon, mise au point par la société privée SpaceX, qui signe ainsi le retour au vol habité des États-Unis depuis leur sol. Les Américains dépendaient depuis neuf ans des coûteux vaisseaux russes Soyouz. **S. R.**
(S. et A. *n° 881)*



REA

8 juin

COUP DE FREIN POUR LA RECONNAISSANCE FACIALE

IBM annonce cesser ses travaux de recherche sur la reconnaissance faciale, prenant acte des biais raciaux dans ces technologies comme la société l'a reconnu dans une lettre au Congrès américain. Le géant de l'informatique attend désormais un débat national sur l'encadrement de leurs usages. Il a été suivi quelques jours plus tard par Microsoft et Amazon. **A. D.**
(S. et A. *n° 881)*

AFP

29 juin

FESSENHEIM S'ARRÊTE DÉFINITIVEMENT

Doyenne des centrales nucléaires françaises, Fessenheim (Haut-Rhin) a vu son deuxième et dernier réacteur fermer le 29 juin. Une décision politique dans le cadre de la transition énergétique. Mise en service en 1977, sise en - zone sismique et inondable, elle a évité une quatrième visite décennale et l'adjonction d'équipements exigée par l'Autorité de sûreté nucléaire. Prolonger son activité de dix ou vingt ans aurait nécessité des investissements à hauteur de 250 millions d'euros. La France dispose désormais de 19 centrales avec 58 réacteurs en activité. **R. M.**
(S. et A. *n° 880)*

NASA

30 juil.

DÉPART DE LA MISSION « ÉCHANTILLONS MARTIENS »

La sonde américaine Mars 2020 a été lancée avec, à son bord, le *rover* Perseverance qui cherchera à identifier d'éventuelles traces de vie fossile sur la planète Rouge. Il collectera des échantillons qui devraient être ramenés sur Terre d'ici à une dizaine d'années.
Le lancement de cette mission a été précédé de deux autres : Al-Amal des Émirats arabes unis, première sonde interplanétaire du monde arabe, partie le 19 juillet, doit étudier l'atmosphère et la météorologie de Mars ; Tianwen-1, lancée quatre jours plus tard par la Chine, la première à réunir un orbiteur, un atterrisseur et un véhicule dans une même fusée. Les trois sondes doivent atteindre Mars en février 2021. **F. D.**
(S. et A. *n° 881 et 883)*

DES STATUES DÉBOULONNÉES

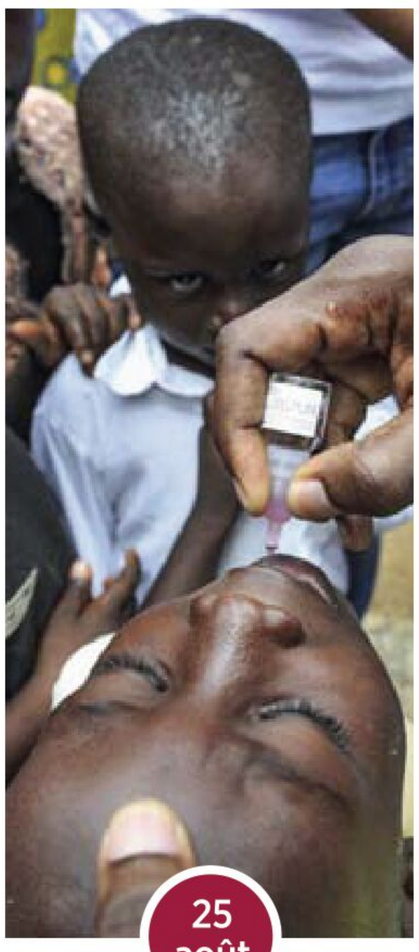
De spectaculaires déboulonnements de statues historiques ont eu lieu à travers le monde. Ils font suite à la mort brutale en juin 2020 de George Floyd aux États-Unis. Les effigies de personnages considérés comme ayant été associés à la colonisation ou la traite des esclaves sont devenues la cible de manifestations contre le racisme et la discrimination, de Fort-de-France en Martinique (France), à Richmond, à Rhode Island (États-Unis), Bristol (Royaume-Uni), ou encore en Belgique. B. A. ***(S. et A. n° 881-882)***

AFP

4 août

BEYROUTH RAVAGÉE PAR UNE EXPLOSION CHIMIQUE

Plus de 200 morts et 6500 blessés. Le bilan de la catastrophe qui a détruit ou endommagé la moitié de la capitale libanaise est lourd. À l'origine du drame : 2750 tonnes de nitrates d'ammonium entreposées depuis douze ans dans un hangar du port. Le même produit avait été à l'origine de l'accident de l'usine AZF, en 2001, à Toulouse. Dans les deux cas, il était stocké sans mesures de sécurité particulières. Au Liban, le nitrate d'ammonium avait été abandonné après l'immobilisation du navire battant pavillon moldave qui le transportait en direction du Mozambique. Quatre mois après, l'enquête sur les causes de l'explosion n'avait pas abouti, des travaux de soudure et un entrepôt de feux d'artifice à proximité restant au cœur de l'enquête.
M. N.
(S. et A. *n° 883)*



AFP

25 août

LE VIRUS DE LA POLIO EST ÉRADIQUÉ DU CONTINENT AFRICAIN

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) annonce l'éradication officielle des poliovirus sauvages du continent africain. *« L'une des plus grandes réalisations de santé publique de notre temps »*, selon le directeur de l'OMS, Tedros Adhanom Ghebreyesus. Des cas « secondaires » issus de souches vaccinales mutées du virus circulent encore, un problème résiduel qui n'obère pas le succès de santé publique. Désormais, seuls quelques territoires inaccessibles à la vaccination, au Pakistan et en Afghanistan, peuvent encore connaître des flambées de poliomyélite : 204 cas y sont actuellement recensés. **H. J.**
(S. et A. *n° 884 et 885*

AFP

7 oct.

LES CISEAUX GÉNÉTIQUES REÇOIVENT LE NOBEL

L'outil moléculaire CRISPR-Cas9 voit ses deux découvreuses récompensées par le Nobel de chimie. En 2012, l'Américaine Jennifer Doudna et la Française Emmanuelle Charpentier publient dans *Science* ce qui allait devenir le mode d'emploi permettant de modifier, remplacer, inactiver des gènes à façon. Peu onéreux, extrêmement efficace, CRISPR-Cas9 s'est imposé dans tous les laboratoires de biologie moléculaire ou de génétique du monde entier non sans poser des questions éthiques.
H. R. (S. et A. *n° 885)*

UNIVERSITY OF ROCHESTER

14 oct.

UN MATÉRIAU RESTE SUPRA-CONDUCTEUR À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Un matériau composé d'hydrogène, de soufre et de carbone propage le courant électrique sans aucune résistance ni perte d'énergie à une température de 14,5 °C. Après des décennies de recherches, c'est le premier supraconducteur à température ambiante. Néanmoins, il nécessite des pressions gigantesques (267 gigapascals), et ses propriétés cristallines ne sont pas encore clairement identifiées. **F. D.**
(S. et A. *n° 886)*

SIPA

20 oct.

UNE SONDE PRÉLÈVE UN ÉCHANTILLON D'ASTÉROÏDE

Quatre ans après son lancement, la sonde américaine Osiris Rex réussit son atterrissage à la surface de l'astéroïde Bénou, à 330 millions de kilomètres de la Terre. Grâce à son bras articulé, elle prélève d'importantes quantités de poussières et de petits cailloux de cet astre riche en eau et en molécules organiques. Au minimum 400 grammes, et peut-être même plus d'un kilogramme. La sonde quittera Bénou au printemps 2021 pour rapporter les échantillons sur Terre en 2023. **F. D.**
(S. et A. *n° 886)*

ADIEU L'ARCTIQUE

Le 24 octobre, la surface de la banquise arctique s'est réduite à 5,685 millions de km² — valeur la plus faible enregistrée depuis 1978. Les températures estivales boréales ont en effet été très élevées : le 20 juin, un record de 38 °C a été enregistré au nord de la Sibérie, contre 17 °C d'ordinaire. La mer des Laptev, normalement l'une des plus durablement gelées de l'océan Arctique, a par ailleurs tardé à se reformer à l'automne. S. R. **A lire sur le site : *sciav.fr/Arctique***

La quête de roches extraterrestres s'emballe

Pendant qu'une mission japonaise rapportait les premiers échantillons d'astéroïde carboné début décembre, la Chine a fait un aller-retour express sur la Lune et les Européens se sont engagés pour assurer le retour de fragments de Mars.

Le conteneur de 40 cm de large renfermant environ 1 gramme d'échantillons d'astéroïde carboné a été récupéré dans le sud de l'Australie.

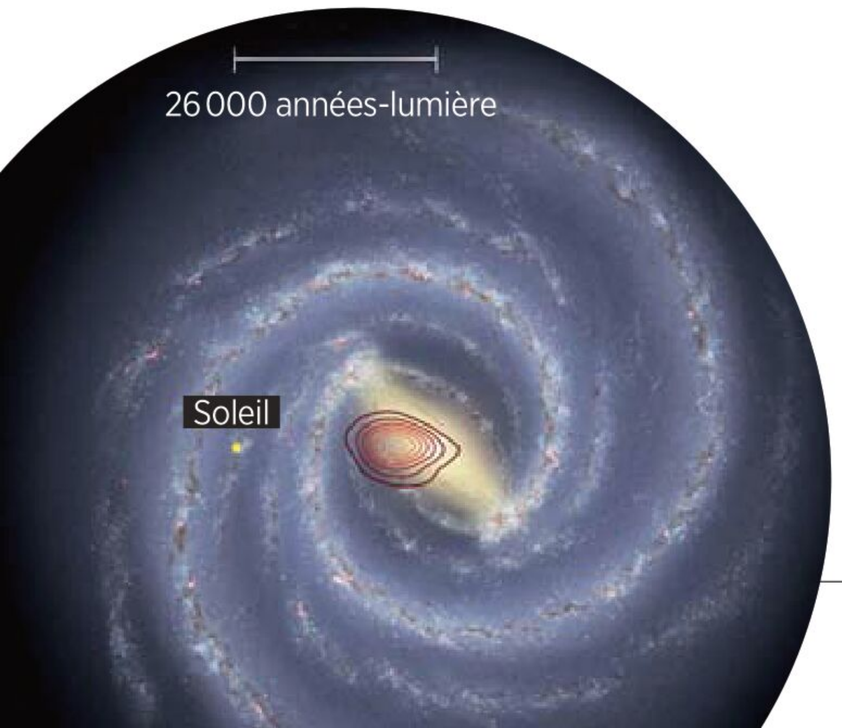
M. SETTE/AFP - JAXA/AFP

EXOCHIMIE Mission accomplie pour la sonde nippone Hayabusa2 ! Après avoir quitté notre planète en 2014 et parcouru 5,3 milliards de kilomètres dans l'espace, elle est retournée le 5 décembre dans l'atmosphère terrestre pour y larguer un petit conteneur, aperçu comme une étoile filante *(photo ci-dessus)*. Récupéré au sud de l'Australie, il contient environ un gramme de poussières extraterrestres grappillées en 2019 sur l'astéroïde Ryugu, à 340 millions de kilomètres de la Terre. C'est la deuxième fois que des fragments d'astéroïde sont rapportés sur notre planète. Mais contrairement à la première — en 2010, grâce au vaisseau Hayabusa — il s'agit cette fois d'échantillons d'astéroïde carboné. Or ce type d'astre, riche en molécules organiques et en minéraux hydratés, est censé contenir les éléments les plus primitifs du système solaire… d'où l'excitation dans la communauté des astronomes ! Les premières analyses — auxquelles une quinzaine de géochimistes français participent — devraient débuter dès ce mois de janvier. **F. D.**

Une galaxie fossile a été découverte au cœur de la nôtre

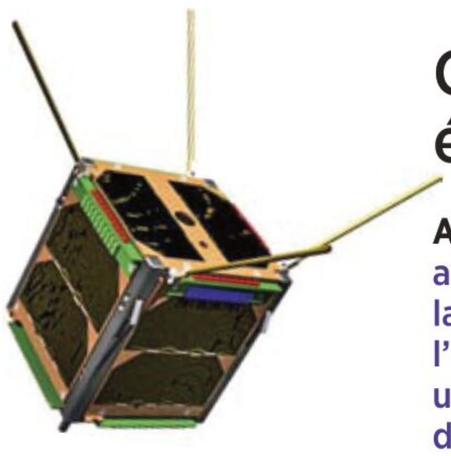
ASTRONOMIE Au centre de la Voie lactée se cache le vestige d'une ancienne galaxie, Héraclès, qui a percuté la nôtre il y a 10 milliards d'années. Il vient d'être démasqué grâce à l'observation de centaines de milliers d'étoiles, parmi lesquelles se dissimulaient quelques intruses avec des vitesses et des compositions chimiques différentes. **J. I.**

SOURCE : D. HORTA-DARRINGTON, UNIVERSITÉ JOHN MOORES, LIVERPOOL,ROYAUME-UNI.



NASA/JPL-CALTECH, SDSS

Le vestige d'Héraclès dans le halo sphérique de la Voie lactée (vue d'artiste).



LEDSAT TEAM

Ledsat, qui fait partie d'un programme de l'Agence spatiale européenne, sera lancé en 2021.

Ce satellite est équipé de LED pour éviter les collisions

ASTRONAUTIQUE Suivre un satellite depuis le sol avec des télescopes et des observatoires équipés de lasers pour diminuer les risques de collision : voilà l'idée qui va être testée avec le Ledsat, un minisatellite équipé de LED (rouge, vert, bleu) et de rétroréflecteurs. Développé dans le cadre du programme Fly Your Satellite ! de l'Agence spatiale européenne (ESA), il sera lancé en 2021 depuis la station spatiale internationale *(lire aussi p. 46)*. **J. I.**

Découverte d'un nouveau minéral pour les batteries

Quoi : un nouveau minéral composé de cristaux bleus et d'inclusions gazeuses, nommé pétrovite.

Qui : il a été découvert par des chercheurs russes de l'université d'État de Saint-Pétersbourg dans la péninsule du Kamtchatka (Russie), sur le volcan Tolbachik.

ST PETERSBURG UNIVERSITY

La pétrovite a été découverte dans la péninsule du Kamtchatka (Russie).

Comment : deux éruptions majeures, en 1975 et 2012, y ont produit une diversité minéralogique inédite.

Pourquoi : la pétrovite, constituée d'oxygène, de sulfure de sodium et de cuivre, possède une structure poreuse qui en fait un matériau intéressant pour les batteries sodium-ion. **S. R.**

AIRBUS DEFENCE & SPACE

QUESTIONS À

Hélène Boithias

Directrice de campagne chez Airbus Defence and Space

L'Europe signe pour le retour des échantillons martiens

L'Agence spatiale européenne (ESA) a conclu un contrat avec Airbus pour réaliser le volet européen de la mission Mars Sample Return (MSR)

Quel est le but de cette mission ?
Elle vise à rapporter les premiers échantillons martiens sur Terre (environ 500 g). C'est une mission internationale. Le premier volet, la mission mars 2020 de la Nasa, a été lancé à l'été 2020 et doit atterrir en février 2021. Son rover, Perseverance, doit collecter et stocker une trentaine de carottes de sol et de roches. Deux missions seront ensuite lancées en 2026 : SRL (Sample Retrieval Lander) de la Nasa et ERO (Earth Return Orbiter) de l'Agence spatiale européenne. Cette dernière sera développée par Airbus.

Comment se déroulera ce retour d'échantillons ?
Le rover doit rapporter les échantillons jusqu'à l'atterrisseur. Un bras manipulateur les transférera dans un conteneur de la taille d'un ballon placé dans la fusée. Après le décollage, celle-ci injectera le ballon en orbite, en direction d'ERO. Le rendez-vous est prévu en 2028.

C'est donc la mission européenne qui effectuera le retour ?
Oui. D'abord ERO rejoindra le conteneur pour le capturer. Ce dernier sera placé dans le véhicule de rentrée atmosphérique. Il devrait tomber dans le désert de l'Utah (États-Unis) en 2031.

Propos recueillis par S. R.

CNSA-CNS/AFP

La sonde Chang'e 5 a collecté quelque 2 kg de roches du sol de la Lune.

La Chine prélève des fragments lunaires

ESPACE Partie le 23 novembre de Wenchang en Chine, la sonde Chang'e 5 s'est posée huit jours plus tard sur la Lune pour y prélever des échantillons, les premiers depuis les missions américaines Apollo et soviétiques Luna menées entre 1969 et 1976. Environ 2 kg ont été collectés. Leur retour est attendu pour le 15 ou le 16 décembre, au moment où vous lirez ces lignes. **F. D.**

ZHENGMAO LU/MIT

Doté de 2 couches, le composite abaisse la température de 7 °C.

Quand les chameaux inspirent des matériaux refroidissants

BIO-INSPIRATION
Une structure composite de 10 millimètres d'épaisseur abaisse la température de 7 °C en s'inspirant de l'épiderme des chameaux. Elle est constituée d'une première couche d'hydrogel qui se refroidit par évaporation de l'eau, mimant l'action des glandes sudoripares. Et d'une seconde d'aérogel, isolant thermique qui reproduit le rôle de la fourrure des camélidés. **F. D.**

SOURCE : ZHENGMAO LU, MIT, CAMBRIDGE, ÉTATS-UNIS.

Une « chimie noire » fabrique des molécules du vivant

BIOCHIMIE La glycine, une brique essentielle de la vie, serait en mesure de se former dans des nuages interstellaires denses bien avant que des étoiles y naissent. Il existerait ainsi une « chimie noire » — qui ne nécessite pas de rayonnement énergétique —, par laquelle cet acide aminé simple se formerait à la surface de grains de poussière gelée. M. B.

SOURCE : SERGIO IOPPOLO, UNIVERSITÉ QUEEN MARY, LONDRES, ROYAUME-UNI.

NASA/ESA/M. LIVIO & HUBBLE

La glycine, molécule prébiotique, pourrait se former dans des piliers de gaz et de poussières (ici Mystic Mountain, situé à environ 7500 années-lumière dans la nébuleuse de la Carène).

IL A DIT

« Vers 2025, le niveau de sensibilité sera tel qu'on pourrait détecter un millier d'ondes gravitationnelles par an »

Matteo Barsuglia, directeur de recherche CNRS, à l'occasion du premier bilan de la collaboration Ligo-Virgo et de la publication d'un premier catalogue de 39 détections en 5 ans d'études.

Les sursauts radio provenaient d'une magnétoile

ASTROPHYSIQUE Alors que les astrophysiciens pensaient que les mystérieux flashs dans le ciel appelés sursauts radio rapides provenaient des confins de l'Univers, ils en ont découvert un émis depuis notre galaxie. Sa source : une étoile à neutrons animée par de puissants champs magnétiques, une magnétoile. **J. I.**

SOURCE : DANIELE MICHILLE, THE CHIME/FRB COLLABORATION.

Le robot ouvrier du bâtiment

ROBOTIQUE L'intelligence artificielle s'attaque au ponçage des murs : le spécialiste américain de robotique Canvas a mis au point une machine entraînée par apprentissage automatique par des professionnels, capable de tenir compte des caractéristiques des cloisons à traiter. Le robot consiste en un bras articulé monté sur roues. Il commence par scanner au lidar la surface à poncer, repérant les irrégularités, puis ponce et époussette. **A. D.**

CANVAS

Le bras articulé scanne au lidar le mur pour repérer les irrégularités avant de commencer à poncer.

VOLVO CARS

Le conducteur voit son environnement naturel auquel sont intégrés des éléments virtuels (obstacle, véhicule à l'arrêt…).

Conduire réellement dans un environnement virtuel

AUTOMOBILE Un conducteur dans une véritable voiture mais avec devant les yeux un casque de réalité virtuelle : voilà l'approche inédite développée par Volvo pour étudier (sur circuit) des situations rares comme le passage soudain d'un animal sauvage ou l'arrêt brusque d'un véhicule. Le casque reproduit fidèlement l'environnement et a la capacité de surimposer, sur commande, un élément virtuel. Toutes les réactions sont enregistrées par des caméras, une combinaison haptique et le siège. **M. N.**

Hyperloop a transporté ses premiers passagers

Ce test sur 500 mètres n'a concerné que deux personnes à une vitesse de 160 km/h.

PHOTOS : VIRGIN HYPERLOOP

Le « voyage » d'essai s'est déroulé à bord de la capsule XP-2 dans un tube de 3,3 m de diamètre, au Nevada (États-Unis).

TRANSPORTS Certes, ce n'était que sur une distance de 500 m, mais pour la première fois, une capsule d'Hyperloop a transporté des passagers, Sara Luchian et Josh Giegel, deux cadres de Virgin Hyperloop. Le test s'est déroulé le 8 novembre 2020 au DevLoop, au Nevada (États-Unis), dans un tube de 3,3 m de diamètre. Ce projet de train à sustentation magnétique est en théorie capable d'aller à 1200 km/h dans un tube à vide, mais pour l'heure il n'a pas dépassé les 160 km/h, la longueur de la piste interdisant d'aller plus vite avant de devoir s'arrêter. Le « voyage » n'a ainsi duré qu'une quinzaine de secondes. Si la capsule de test appelée XP-2 n'a été construite que pour deux personnes, le véhicule final devrait en transporter 28. Il est encore trop tôt pour évoquer sérieusement un lancement commercial, mais Virgin Hyperloop avance l'année 2025 pour ses projets en Arabie saoudite ou à Dubaï. **A. D.**

3 Le niveau d'autonomie sur route accordé à Honda

TRANSPORTS
Le japonais Honda est le premier constructeur automobile autorisé à commercialiser des voitures pouvant évoluer de façon totalement autonome, le conducteur devant seulement reprendre le contrôle en cas de besoin (soit le niveau 3 d'autonomie sur une échelle de 1 à 5). Le système ne pourra cependant être activé qu'au Japon, sur autoroute, à moins de 50 km/h. M. N.

Apple produit ses propres puces pour ses ordinateurs

INFORMATIQUE Après ses smartphones, ses montres ou ses tablettes, Apple commence à équiper ses ordinateurs de puces maison, tournant la page Intel. Quand ce dernier arrive tout juste à proposer une finesse de gravure de 10 nanomètres (nm), Apple est déjà descendu à 5 nm grâce à son partenaire, le fondeur de puces taïwanais TSMC. En outre, l'architecture adopte la technologie ARM où tous les éléments — processeur, coprocesseur graphique, mémoire vive, etc. — sont assemblés sur une seule et même puce. **M. N.**

Prix Bettencourt

Coups d'élan pour la recherche française

LAURÉATS 2020

CÉCILE CHARRIER
Chargée de recherche à l'Inserm

INSTITUT DE BIOLOGIE
DE L'ECOLE NORMALE SUPÉRIEURE, PARIS
Projet : Mécanismes fondamentaux et régulations spécifiques
à l'homme du développement et de la plasticité des synapses

MARIE MANCEAU
Directrice de recherche au CNRS

CENTRE INTERDISCIPLINAIRE DE RECHERCHE EN BIOLOGIE,
COLLÈGE DE FRANCE, PARIS
Projet : Contrôle développemental de la formation
des motifs cutanés aviaires

SUSANA COELHO
Directrice de recherche au CNRS

STATION BIOLOGIQUE DE ROSCOFF
Projet : L'origine et l'évolution des sexes : de nouvelles idées
à partir des algues brunes

© Art in Research / A. Darmon

NICOLAS MINC
Directeur de recherche au CNRS

INSTITUT JACQUES MONOD, PARIS
Projet : Auto-organisation et division de l'œuf : depuis les forces
du cytosquelette jusqu'aux signaux développementaux

DONNONS DES AILES AUX TALENTS

La Fondation Bettencourt Schueller soutient des chercheurs
et des équipes dans les instituts de recherche publics
en sciences de la vie. Elle investit pour le rayonnement
de la recherche française et l'amélioration de la santé humaine.

Fondation
Bettencourt
Schueller

Reconnue d'utilité publique depuis 1987

Le diamant mandarin mémorise 50 chants

C'est la première fois qu'une telle capacité de reconnaissance vocale est observée chez une autre espèce que l'être humain.

L'oiseau mémorise le chant de ses congénères après seulement cinq écoutes.

O. GIEL / JUNIORS / BIOSPHOTO

ORNITHOLOGIE Les diamants mandarins sont capables de mémoriser les signatures vocales d'une cinquantaine de leurs congénères. Et ces petits oiseaux au comportement hautement social n'ont besoin d'entendre que cinq fois le chant de leurs pairs pour les mémoriser.

Pour arriver à cette conclusion, des scientifiques ont étudié une vingtaine d'oiseaux auxquels ils ont appris les signaux vocaux des uns et des autres. Ils leur ont soumis ensuite différents signaux dont ceux de congénères inconnus. Résultat : quatre d'entre eux ont reconnu 42 vocalisateurs parmi les 56 auxquels ils ont été confrontés. Mieux : cette capacité est restée intacte un mois après la mémorisation. C'est la première fois qu'une communication sociale mettant en jeu de telles capacités cognitives de reconnaissance vocale est observée chez une autre espèce que l'être humain, à qui deux mots suffisent pour distinguer parmi d'autres voix celle d'un ami ou d'un parent. **A. T.**

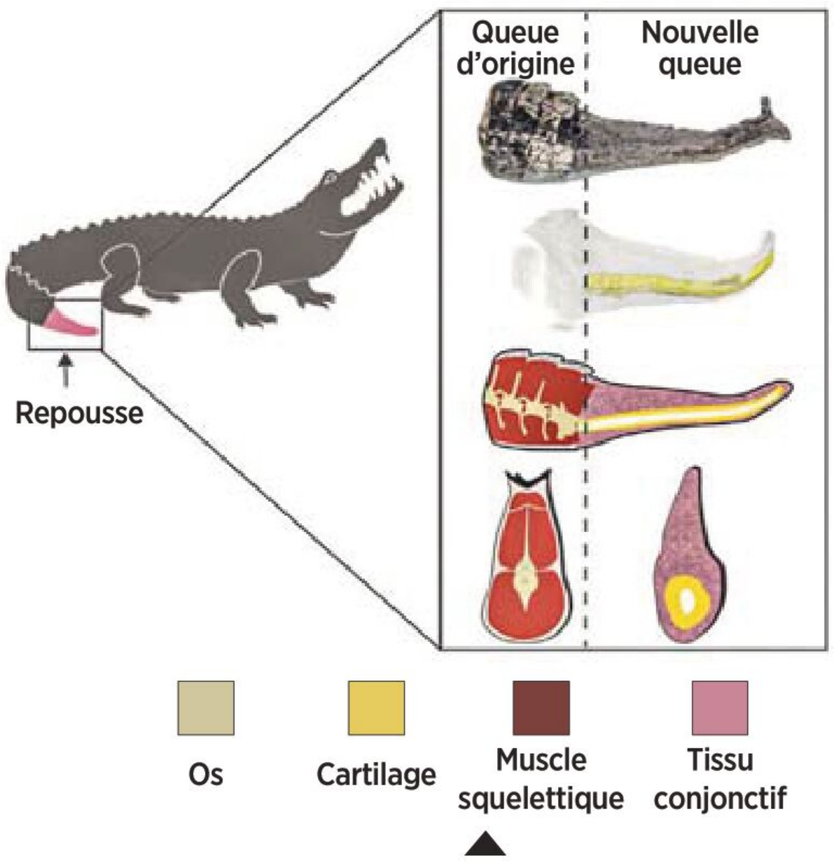
Le secret du dauphin pour plonger longtemps

MIRAGE, SIEGFRIED AND ROY'S SECRET GARDEN AND DOLPHIN HABITAT

CÉTOLOGIE Les dauphins ont la capacité de ralentir leur cœur avant de plonger. Cette découverte a été faite grâce à trois dauphins équipés d'un appareil pour suivre leur rythme cardiaque *(photo ci-contre)* et entraînés à plonger plus ou moins longtemps. Les cétacés ralentissent leur rythme cardiaque d'autant plus rapidement et fortement qu'ils se préparent à une longue plongée. **S. R.**

SOURCE : FAHLMAN ANDREAS, FUNDACIÓN OCEANOGRÀFIC, VALENCE, ESPAGNE.

Des alligators peuvent faire repousser leur queue



L'anatomie du nouvel appendice diffère de celle d'origine.

HERPÉTOLOGIE Les alligators d'Amérique peuvent voir leur queue repousser après une amputation. Cependant, le nouvel appendice n'est pas tout à fait identique à celui d'origine : il se compose d'un squelette central cartilagineux et non plus osseux. Par ailleurs, du tissu conjonctif a pris la place des muscles squelettiques perdus. **A.-S. T.**

CINDY XU, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE L'ARIZONA, TEMPE, ÉTATS-UNIS.

ARIZONA STATE UNIVERSITY

Le puma et le renard se partagent la chasse

ÉTHOLOGIE Dans les vallées des Andes chiliennes, le puma et le renard de Magellan sont les seuls prédateurs à se partager un éventail restreint de proies. Grâce à 50 caméras et l'analyse d'excréments, des scientifiques ont établi que l'alimentation des pumas est surtout constituée de lièvres d'Europe, tandis que les renards de Magellan se contentent de lapins, de rongeurs et de graines. Deux menus différents pour éliminer tout conflit alimentaire. **S. R.**

SOURCE : CHRISTIAN OSORIO, UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DU CHILI, SANTIAGO.

Les ornithorynques sont biofluorescents sous les UV

Le pelage vu sous lumière UV (à gauche et au centre) et en lumière visible (à droite).

ANICHET AL

BIO-OPTIQUE En plus d'avoir un bec de canard, une queue de castor et un venin puissant, les ornithorynques sont également biofluorescents ! Exposé à de la lumière UV, le pelage brun de spécimens conservés dans des musées apparaît dans des teintes vert-cyan : le pelage absorbe les ultraviolets pour émettre en retour un rayonnement dans le spectre du visible. **A. T.**

SOURCE : E. OLSON, UNIVERSITÉ NORTHLAND, ÉTATS-UNIS.

*À force d'entendre qu'on ne vaut rien, on finit par le croire.

APPRENTIS D'AUTEUIL

À Apprentis d'Auteuil, nous voyons le meilleur en chacun des 30 000 jeunes (1) que nous accompagnons jour après jour dans nos 240 établissements. Aidez-les à construire leur avenir.

LA CONFIANCE PEUT SAUVER L'AVENIR

FAITES UN DON sur www.apprentis-auteuil.org

(1) Selon le rapport d'activité Apprentis d'Auteuil 2019.
Agence Marcel - © Aurélien Chauvaud.

Cette plante change de couleur pour ne pas être cueillie

YANG NIU

Normalement verte, « Fritillaria delavayi » adopte une couleur marron pour se fondre dans son milieu (à droite).

MIMÉTISME C'est une petite plante qui sait se faire discrète. Utilisée dans la pharmacopée traditionnelle chinoise, *Fritillaria delavayi* adopte un habillage bien plus discret dans les zones où elle est cueillie alors qu'elle est bien verte ailleurs. Entre le brun et le gris, sa nouvelle teinte la rend difficilement discernable de son environnement. C'est l'un des rares cas documentés d'une stratégie végétale défensive induite par la pression sélective humaine. **J. I.**

SOURCE : YANG NIU, ACADÉMIE CHINOISE DES SCIENCES, KUNMING, CHINE.

RYOTA KAWANISHI & SHINPEI OHASHI/ THE JAPANESE SOCIETY OF SYSTEMATIC ZOOLOGY

◄ **« Elthusa splendida »** était fixé sur le palais d'un requin conservé à Hokkaido, au Japon.

Un crustacé caché dans un musée

CARCINOLOGIE Un rare crustacé parasite, *Elthusa splendida*, a été découvert dans la gueule d'un requin mort pêché au large de la Chine et conservé au sein d'une collection du musée de l'université de Hokkaido (Japon). Seulement cinq autres spécimens, découverts au sud du Brésil, avaient été décrits jusque-là, en 1981. Le parasite a pour particularité de se fixer sur le palais de son hôte. **A.-S. T.**

SOURCE : RYOTA KAWANISHI, UNIVERSITÉ DE HOKKAIDO, SAPPORO, JAPON.

EN DEUX MOTS

GÉOTHERMIE. La construction d'une centrale géothermique à Strasbourg a été stoppée après plusieurs séismes liés à l'activité humaine. **FONTE.** Une capsule temporelle contenant lettres, cartes postales, badges, volontairement piégée dans les glaces de l'Arctique, a été recueillie en Irlande après seulement 2 ans contre 30 à 50 prévus. **FERMETURE.** La ferme « des 1000 vaches » va mettre fin à son activité laitière le 1er janvier 2021 sans avoir réussi à rassembler plus de 800 têtes sur son site.

MARIE TOUSSAINT

QUESTIONS À

Marie Toussaint

Juriste en droit international de l'environnement et eurodéputée écologiste

Ce que changerait la notion de crime d'« écocide »

Annoncé par le gouvernement fin novembre, le « délit d'écocide » a été préféré au « crime d'écocide » proposé par la Convention citoyenne pour le climat.

Qu'est-ce que le crime d'écocide ?
Il s'agit d'atteintes graves aux écosystèmes. L'objectif est de condamner les actions qui affectent l'ensemble de la planète et de ses habitants, donc de les prévenir, d'obliger à les réparer. La notion a failli être intégrée parmi les compétences de la Cour pénale internationale (CPI) en 1993 mais plusieurs pays dont la France s'y sont opposés considérant qu'elles ne pouvaient porter que sur les seuls droits humains.

Le gouvernement a préféré requalifier l'écocide en délit plutôt qu'en crime : est-ce suffisant ?
Cela ne répond pas du tout à l'enjeu. Le gouvernement propose la création d'un délit qui ne correspond pas à la définition originelle de l'écocide. Ce délit de pollution généralisé et les juridictions spécialisées qui seront créées donneront de la visibilité aux atteintes à l'environnement, mais cela reste insuffisant : les condamnations resteront toujours aussi rares.

Quel lieu pour statuer sur les écocides ?
Le ministère de la Justice nous dit que c'est impossible pour la cour d'assises. Ce que nous demandons, c'est une procédure spécifique qui soit à la hauteur des actes commis. La Convention citoyenne pour le climat a ainsi proposé de créer une Haute Autorité des limites planétaires qui pourrait accompagner les tribunaux.

Propos recueillis par L. C.

Le transport aérien en chiffres

100 000
Le nombre d'avions qui volaient chaque jour avant la crise du Covid-19.

11 % de la population mondiale prenaient l'avion dont un quart n'effectuait qu'un voyage par an.

4 % de la population mondiale a emprunté un vol international.

12 % des voyageurs représentent 68 % des vols, dont la majorité en 1re classe où un siège occupe 5,5 fois plus d'espace qu'en classe économique. **L. C.**

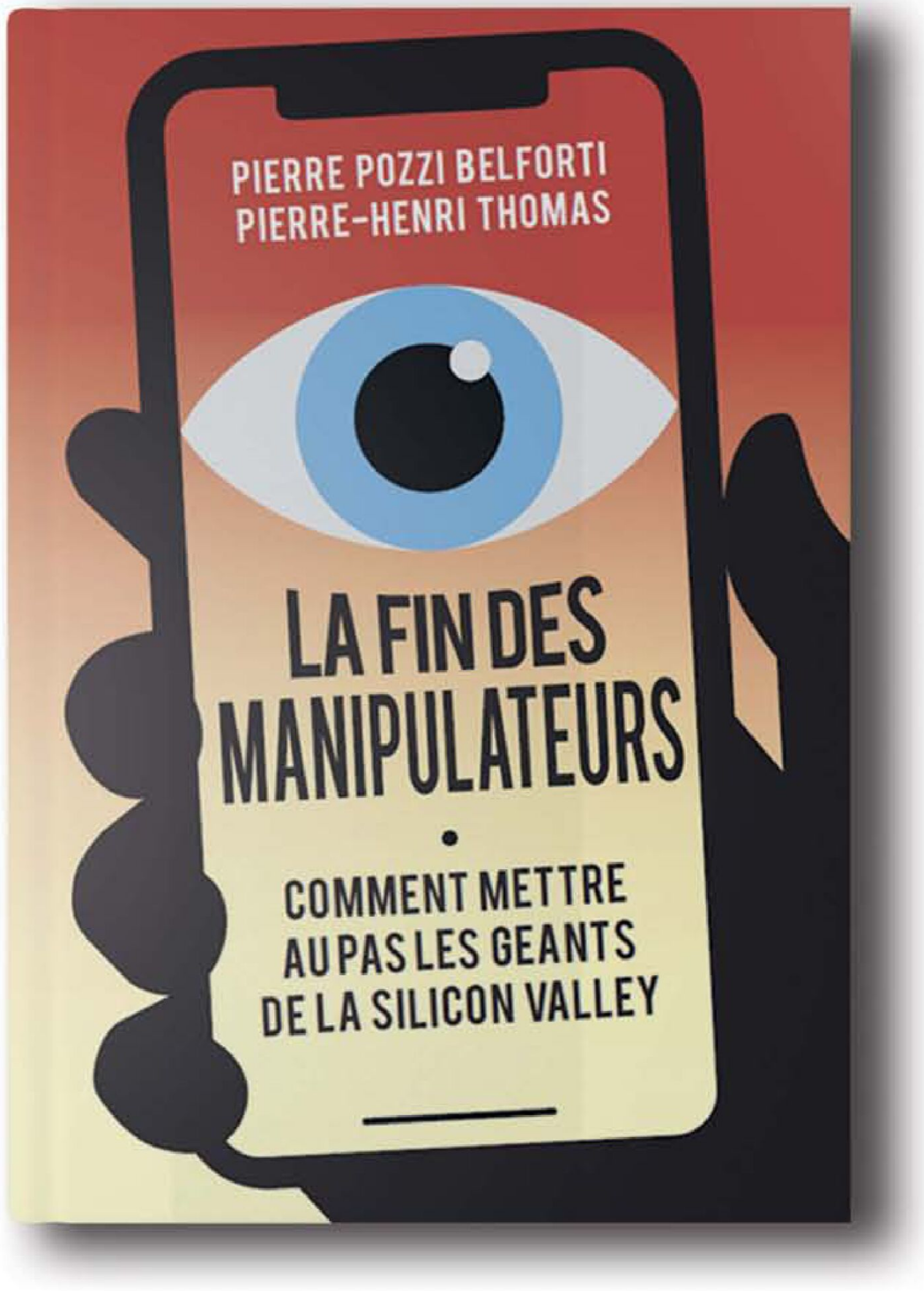
SOURCE : STEFAN GÖSSLING, UNIVERSITÉ DE LUND, SUÈDE.

ÉDITIONS

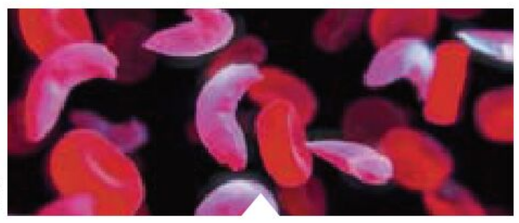
Saint-Simon

« Cette découverte semble miraculeuse elle garantit un très haut niveau de sécurité tout en protégeant la vie privée »

G.F. *Challenges*



EN LIBRAIRIE



BSIP

Globules rouges falciformes, typiques de la drépanocytose.

Une thérapie génique contre des maladies du sang

HÉMATOLOGIE Dix patients atteints de formes sévères de drépanocytose et de bêta-thalassémie, deux maladies génétiques altérant la capacité des globules rouges à transporter l'oxygène, ont connu une nette amélioration de leur état grâce à une thérapie génique utilisant l'outil CRISPR-Cas9. Un an après avoir reçu ce traitement modifiant le gène défectueux, les patients n'avaient plus besoin de transfusions sanguines dont ils étaient dépendants. **H. J.**

SOURCE : HAYDAR FRANGOUL ET AL., NEW ENGLAND JOURNAL OF MEDICINE.

Surveiller son glaucome de chez soi

OPHTALMOLOGIE Pour la première fois, une étude conduite à l'université de Londres (Royaume-Uni) démontre que les tests oculaires de surveillance pour le glaucome peuvent être effectués à domicile. Vingt patients ont reçu un prototype de test oculaire sur tablette dit Eyecatcher qu'ils ont utilisé durant six mois, obtenant des résultats aussi précis qu'à l'hôpital. **S. R.-M.**

PETER R. JONES ET AL.

Le test oculaire sur tablette, réalisé à domicile, est aussi efficace qu'à l'hôpital.

SHUTTESTOCK

Les patients ont reçu de l'oxygène pur durant une à deux heures par jour pendant soixante jours.

Un traitement par oxygène inverse le vieillissement

Administrer de l'oxygène pur à des personnes dans un caisson hyperbare réduit le nombre de cellules sénescentes.

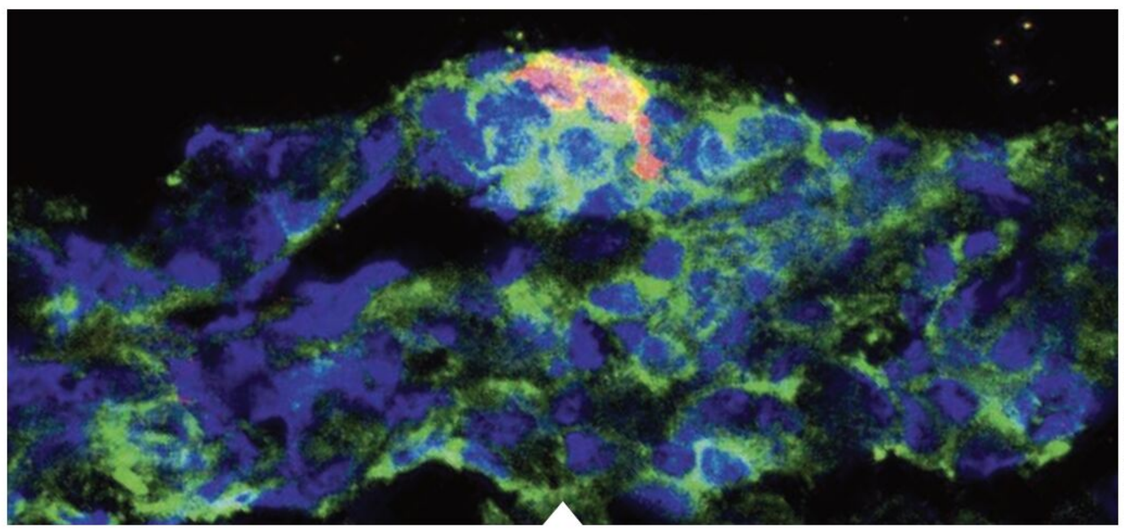
PHYSIOLOGIE Une fontaine de jouvence version laboratoire biologique : des chercheurs israéliens ont inversé le vieillissement naturel des cellules chez 35 patients âgés de plus de 64 ans. Pour cela ils les ont soumis à un programme de traitement par oxygénothérapie hyperbare (OHB). À raison d'une séance d'une à deux heures par jour durant soixante jours, les médecins ont administré de l'oxygène pur aux patients placés dans un caisson où la pression est supérieure à celle de l'atmosphère, ce qui a pour effet de multiplier la concentration d'oxygène dans les poumons et le sang. Dans les échantillons sanguins analysés au cours du protocole, les chercheurs ont observé une réduction totale de 37 % du nombre de cellules sénescentes. Mais aussi un accroissement de 38 % des télomères, ces régions situées à l'extrémité des chromosomes, qui protègent le génome de nos cellules et donc prolongent leur jeunesse. **H. J.**

SOURCE : YAFIT HACHMO, CENTRE MÉDICAL ASSAF HAROFEH (ISRAËL).

Le bonheur empêche la mémoire de décliner

COGNITION En analysant des données issues d'une étude s'étendant sur plus de dix-huit ans aux États-Unis, des chercheurs ont établi que l'affect positif, c'est-à-dire le fait de se sentir subjectivement heureux, est associé à une moindre perte de mémoire entre l'âge adulte et la fin de la vie. Les capacités de mémoire diminuent invariablement avec l'âge, mais ce déclin est moins rapide chez les individus qui se sont sentis plus heureux. **A. T.**

SOURCE : E. HITTNER, UNIVERSITÉ NORTHWESTERN, ÉTATS-UNIS.



A.-K. PRÖBSTEL, UNIVERSITY OF BASEL, L. SCHIRMER, HEIDELBERG

Cellules immunitaires intestinales (en rouge) dans le tissu cérébral.

Le microbiote au secours de la sclérose en plaques

NEUROLOGIE Certaines cellules du microbiote intestinal migrent au cerveau lors des poussées de sclérose en plaques au cours desquelles l'enveloppe des neurones est détériorée. Selon des chercheurs américains, les agents envoyés par notre microbiote à travers le liquide céphalo-rachidien permettraient d'aider le cerveau à contrer le phénomène et à stopper ainsi la poussée. Cette découverte pourrait déboucher sur une nouvelle approche thérapeutique. **H. J.**

SOURCE : ANNE-KATRIN PRÖBSTEL ET AL., UNIVERSITÉ DE BÂLE, SUISSE.

9 900 Le nombre de marqueurs génétiques liés à la taille

ANTHROPOMÉTRIE Le mystère de la taille — pourquoi est-on grand ou petit — reste entier. De nouveaux travaux compilant 201 études, comprenant en tout 4,1 millions de participants, ont permis d'identifier près de 10 000 marqueurs génétiques associés à la taille, sur seulement 30 % du génome. Et ils n'expliqueraient que 40 % des variations de la stature. **C. L.**

SOURCE : L. YENGO, THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND, AUSTRALIE.

« Aedes aegypti » s'infecte avec le virus Zika en se nourrissant de sang contaminé.

Le moustique est plus souvent infecté par Zika hors d'Afrique

INFECTIOLOGIE Les moustiques *A. aegypti* présents hors d'Afrique (hormis le Sénégal) sont plus facilement infectés par le virus Zika, qu'il transmettent ensuite par piqûre. L'explication tiendrait à une modification génétique qui reste à localiser. C'est une possible explication des grosses épidémies sur le continent américain et les îles du Pacifique. **P. K.**

SCIENCE, F. AUBRY, INSTITUT PASTEUR, PARIS.

FELIX HOL/BLAISE DAURES/LOUIS LAMBRECHTS

L'isolement social fait autant souffrir que la faim

NEUROSCIENCES *« L'isolement aigu provoque un besoin social, de même façon que le jeûne provoque la faim »*, affirment des chercheurs américains. Ils ont étudié 40 volontaires maintenus dix heures durant sans contact social ou sans nourriture. D'après les images de leur cerveau, l'activité de leurs neurones synthétisant la dopamine (hormone liée à la récompense) augmente de la même manière à la vue d'un sourire ou d'un plat appétissant. **C. G.**

SOURCE : LIVIA TOMOVA, MIT, CAMBRIDGE, ÉTATS-UNIS.

Un traitement contre la progéria

PÉDIATRIE Le tout premier médicament destiné aux enfants souffrant de la progéria, une maladie génétique rare responsable d'un vieillissement accéléré, vient de recevoir le feu vert des autorités américaines pour sa commercialisation. Zokinvy, de la société américaine Eiger Biopharmaceuticals, permettrait de gagner deux ans et demi d'espérance de vie alors que celle-ci plafonne aujourd'hui à douze ans. **S. R.-M.**

La maladie entraîne chez les enfants un vieillissement accéléré.

THE PROGERIA RESEARCH FOUNDATION

www.lesproduitsdumois.com

VERTIGES, PERTES D'ÉQUILIBRE, INSTABILITÉ ?

Vos troubles de l'équilibre impactent votre qualité de vie ? Vos troubles de l'équilibre sont dus à des altérations de la microcirculation et au stress. Grâce à sa composition Unique et Naturelle, **AUDISTIM® Équilibre va vous soulager !** L'écorce de pin maritime (EPM 150®) et le Gingembre améliorent la microcirculation, favorisent l'oxygénation cérébrale et contribuent à une bonne santé vasculaire. La Passiflore, l'Aubépine, le magnésium et le zinc diminuent le stress. Cure de 3 mois minimum.

■ AUDISTIM® Equilibre, en pharmacie, sur www.audistimpharma.com
AUDISTIMPHARMA à votre écoute : 05 56 69 13 84

PERTE DE CONCENTRATION ET DE MÉMOIRE ?

AVEZ-VOUS DÉJÀ EU LA SENSATION DE NE PLUS AVOIR LES IDÉES CLAIRES, D'AVOIR LE CERVEAU EMBRUMÉ ?

Les comprimés naturels **Cerveau Clair** apportent en quelques heures des vitamines et des nutriments essentiels aux zones de la concentration et de la mémoire du cerveau. Ils contiennent de la L-théanine issue du Thé vert, des extraits de Grenade, de Pin maritime et de Noix, ainsi que des Vitamines B et de l'Iode, dont l'efficacité pour **améliorer les performances mentales et les fonctions cognitives** (mémoire, attention, concentration) a été démontrée dans de nombreuses études scientifiques.
Ils protègent également le cerveau du vieillissement et réduisent la fatigue.
Cerveau Clair tonifie et revitalise votre cerveau pour vous aider à garder les idées claires !

■ Boite de 60 cp. En pharmacie - ACL 2951863 - Convient aux jeunes et aux moins jeunes, aux végétariens et aux végétaliens - Non testé sur les animaux. Questions ? Les experts New Nordic vous répondent au 01 85 12 12 12 (tarif local) - www.vitalco.com

INNOVATION dans la lutte CONTRE les DOULEURS : NOCICEPTOL, gel antidouleur efficace et rapide !

La vie quotidienne, le sport, l'âge... sont à l'origine de bien des douleurs. Débarrassez-vous en maintenant avec **Nociceptol**, concentré d'actifs naturels à base d'huiles essentielles.
Son efficacité a été scientifiquement prouvée !

■ En pharmacie ACL 2035445. www.nociceptol.fr
14,90€ le tube de 120 ml. Existe aussi en complément alimentaire. Laboratoire Polidis - 01 47 51 28 00.
Dispositif médical, CE (Etude in-vivo, 12POGAD02, Nov 2013). Consulter les instructions avant utilisation.

DÉCOUPEZ ET DONNEZ CE COUPON À VOTRE PHARMACIEN

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE
Pour paraître dans cette rubrique, R'Médias 01 46 48 85 41 - photos D.R.

SHUTTERSTOCK

Un faible apport en calcium, moins présent dans les régimes végétaliens, peut contribuer à une moindre densité osseuse.

Les végétaliens sont plus à risque de fractures

Un indice de masse corporelle moins élevé que chez les mangeurs de viande expliquerait cette faiblesse des os.

NUTRITION Attention aux fractures si vous êtes végétalien (ne consommant ni viande, ni poisson, ni œufs, ni produits laitiers) ou végétariens (ni viande, ni poisson). Telle est la conclusion d'une étude menée par l'équipe de Tammy Tong, de l'université d'Oxford (Royaume-Uni). Conduite sur 54 898 participants (végétariens, végétaliens, consommateurs de poissons ou consommateurs de viande) suivis pendant dix-huit ans, l'étude, qui a recensé 3941 fractures, conclut que les végétaliens ont un risque de fractures de hanche, de jambe et de vertèbre supérieur à celui des omnivores. Dans quelle proportion ? Pour les fractures de hanche, il est multiplié par 2,3. Chez les mangeurs de poissons et les végétariens, la fracture de hanche est également la plus importante (26 % et 25 %). Pour l'expliquer, les auteurs pointent l'indice de masse corporelle (IMC, soit le poids divisé par le carré de la taille) en moyenne moins élevé chez les non-mangeurs de viande, ainsi que des apports moindres en calcium et en protéines qui contribuent à une bonne santé des os. **E. S.**

IL A DIT

« L'élimination d'un cancer [celui du col de l'utérus] aurait auparavant semblé un rêve impossible, mais nous disposons aujourd'hui d'outils efficaces et peu coûteux pour faire de ce rêve une réalité » **Tedros Adhanom Ghebreyesus,** directeur général de l'OMS, présentant une stratégie mondiale pour éliminer le cancer du col de l'utérus.

Le cerveau apprend différemment à l'âge adulte

COGNITION Si apprendre une langue pour un adulte est plus dur que pour un enfant, c'est peut-être que les mécanismes cérébraux en jeux ne sont pas les mêmes. Chez l'enfant, des régions cérébrales de l'hémisphère gauche se spécialisent pour la comprendre et la parler. Mais chez l'adulte, si parler repose aussi sur l'hémisphère gauche, la compréhension mobilise des zones du côté droit. **A. T.**

SOURCE : K. GURUNANDAN, BASQUE CENTER ON COGNITION, BRAIN AND LANGUAGE, ESPAGNE.

La recherche médicale passe à l'ère du numérique

INVESTISSEMENT Un centre de recherche axé sur l'usage du numérique et de l'intelligence artificielle dans les questions de santé va voir le jour à Paris. 400 millions d'euros, sur fonds publics et privés, seront investis dans ce projet, a annoncé Emmanuel Macron lors de sa visite le 4 décembre à l'Institut Imagine (hôpital Necker à Paris). « Paris Santé Campus » se matérialisera par un vaste chantier immobilier au Val-de-Grâce, dans le centre de la capitale. O. L.

SIPA

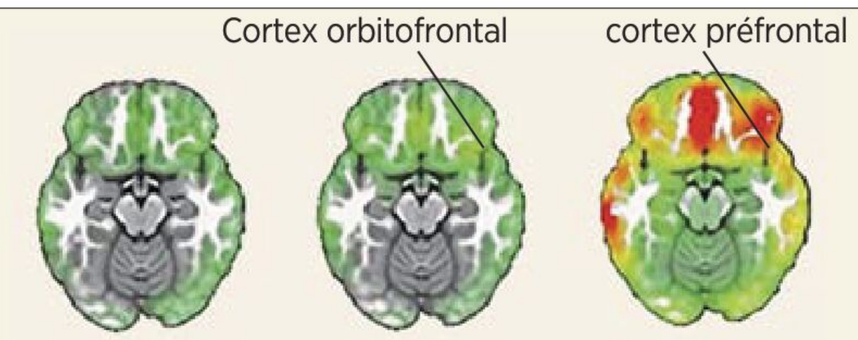
Paris Santé Campus sera installé, en lieu et place de l'hôpital du Val-de-Grâce, fermé depuis 2016.

BSIP

La baisse des vaccinations dans les pays touchés par le Covid-19 a fait exploser les cas de rougeole.

Alerte à la rougeole

ÉPIDÉMIOLOGIE Après des reculs réguliers entre 2010 et 2016, la rougeole fait son retour dans le monde. En 2019, cette infection virale a fait plus de 200 000 morts, contre moins de 90 000 en 2016, a alerté l'Organisation mondiale de la santé. En cause : un coup d'arrêt aux campagnes de vaccination dans les pays confrontés à l'épidémie de Covid-19. **A.-S. T.**



T. CHABIN ET AL.

Les zones cérébrales des frissons musicaux

IMAGERIE Visualiser les zones cérébrales associées aux frissons de plaisir musical, qui nécessitait jusque-là des techniques d'imagerie lourdes, peut se faire par simple électroencéphalographie (EEG). Des chercheurs français ont en effet réussi à observer ainsi l'activité de ces zones chez des participants qui écoutaient leurs musiques favorites en indiquant continuellement leur niveau de plaisir musical, du neutre aux frissons. **A. T.**

SOURCE : T. CHABIN, UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ, FRANCE.

–90 % La baisse du risque accru de mortalité cardio-vasculaire en cessant de fumer à 40 ans

PRÉVENTION Les données recueillies auprès de 400 000 Américains révèlent que plus l'arrêt du tabac est précoce, plus le risque cardio-vasculaire diminue : avant 34 ans, on ne note plus de différence avec les non-fumeurs. **C. G.**

SOURCE : BLAKE THOMSON, UNIVERSITY OF OXFORD À OXFORD, ROYAUME-UNI.

SHUTTERSTOCK - UZU

Les plaquettes de frein émettent des poussières métalliques retrouvées ici sur une feuille de salade (à droite).

Des particules fines davantage novices

Celles issues des freins de véhicules et des feux de cheminées sont les plus dangereuses.

PNEUMOLOGIE Alors qu'elles ne sont évaluées que par leur seule masse exprimée en microgrammes par mètre cube d'air, les particules fines qui polluent l'atmosphère ne sont en réalité pas toutes équivalentes en matière de nocivité. Une équipe de l'institut Paul-Scherrer (Suisse) et de l'université de Grenoble-Alpes a réussi à mettre en exergue des différences en exposant *in vitro* des tissus de poumons humains aux différents types de poussières contenant des éléments organiques, comme le carbone, et inorganiques comme le sulfate ou les nitrates, mais aussi les métaux comme le plomb, arsenic, le cuivre. Conclusion : ce ne sont pas les oxydes d'azote recombinés aux nitrates et sulfates provenant conjointement de l'agriculture et des moteurs thermiques qui sont les plus dangereux, mais les métaux traces comme le cuivre provenant des plaquettes de frein et de l'usure des pneus des véhicules automobiles, ainsi que celle des particules issues des cheminées (hydrocarbures imbrûlés). **L. C.**

BUSINESS WIRE

Le médicament contient des microdoses d'arachide.

Un espoir pour les allergiques à la cacahuète

THÉRAPEUTIQUE Les enfants et adolescents allergiques aux arachides vont bientôt avoir accès à une immunothérapie orale qui vient d'obtenir un avis favorable de l'Agence européenne des médicaments : le Palforzia. Elle consiste à administrer chaque jour des microdoses d'arachides en quantité croissante pour les désensibiliser. **S. R-M.**

L'œil de Lascar

2020, L'ANNÉE DU CORONAVIRUS, 2021, celle du vaccin. Pour en assurer le succès, le ministre de la Santé Olivier Véran veut s'appuyer sur les médecins généralistes et sur la transparence, notamment sur l'aspect financier de la vaccination *(lire aussi p. 68).* **O. L.**

Des boulettes hallucinogènes consommées sur un site d'art rupestre

PRÉHISTOIRE Des « chiques » de plantes contenant des alcaloïdes hallucinogènes (atropine et scopolamine) ont été retrouvées dans l'abri orné de Pinwheel Cave, en Californie, associant directement pour la première fois, art rupestre et hallucinogènes. Ces boulettes végétales mâchouillées sont un témoignage de consommation d'hallucinogènes par des populations ancestrales, qui a pu influencer la réalisation de certains graphismes. **B. A.**

R. BURY - M. DABULAMANZI

Cette peinture de Pinwheel Cave *(à gauche)* représenterait une plante hallucinogène *(à droite)*.

AHMED HASAN/AFP

Richement décorés, les sarcophages devraient être exposés notamment au futur Grand Musée égyptien, au Caire.

Découverte d'une centaine de sarcophages égyptiens

Les momies vieilles de 2500 ans ont été extraites de l'ancien cimetière de Saqqarah, au sud du Caire.

ÉGYPTOLOGIE Les défunts espéraient l'éternité, ils n'auront connu qu'à peine 2500 ans de tranquillité… Pour la troisième fois depuis le 3 octobre dernier, et lors d'un spectacle désormais bien rodé, les autorités des Antiquités égyptiennes ont dévoilé plus de 100 nouveaux sarcophages en bois richement décorés, qualifiant la trouvaille de *« plus grande découverte archéologique de l'année »*. Ils ont été remontés des profondeurs de l'ancien cimetière de Saqqarah, à 20 km au sud du Caire. Les momies ont été ensuite présentées à la presse encore scellées dans leur écrin funéraire. Elles devraient rejoindre plusieurs musées du pays, parmi lesquels le Grand Musée égyptien (GEM) en cours d'achèvement non loin des pyramides du plateau de Gizeh. Saqqarah était la nécropole de Memphis, qui avait été la capitale de l'Ancien Empire (2700-2200 avant J.-C.) et était restée une cité prospère. La richesse des habitants se reflète dans l'éclat des décors de ces sarcophages polychromes. Courant octobre 2020, 59 cercueils intacts avaient déjà été exhumés dans le complexe funéraire. **B. A.**

1600 avant J.-C.

L'âge retrouvé du disque de Nebra

PROTOHISTOIRE Alors que le disque de Nebra découvert en Allemagne en 1999 avait été rajeuni de mille ans cet été *(lire* S. et A. *n° 884 p. 18)*, son statut de plus ancienne représentation connue de la voûte céleste vient d'être rétabli. Dans un article, 13 spécialistes ont réfuté point par point l'étude précédente, confirmant que le disque date de l'âge du bronze. **B. A.**

SOURCE : ERNST PERNICKA, UNIVERSITÉ DE TÜBINGEN, ALLEMAGNE

Les dessins anciens gardent la mémoire de leur lieu de conservation

PATRIMOINE Des traces d'ADN ont été retrouvées sur sept dessins de Léonard de Vinci. Elles appartiennent à plusieurs souches de bactéries et à des champignons, apportées par les mains qui les ont manipulés ou à des insectes qui s'y sont posés. Ainsi, chaque dessin porte une signature unique permettant d'identifier les lieux où il a été stocké. **J. I.**

SOURCE : GUADALUPE PIÑAR, UNIVERSITY OF NATURAL RESOURCES AND LIFE SCIENCES, VIENNE, AUTRICHE.

PHOTOS : B. BÉTEND-DESGRANGES, INRAP - DENIS GLIKSMAN, INRAP

Un vase en verre ouvragé, des boucles d'oreille en or, des épingles en ambre ont été mis au jour dans une nécropole de l'Antiquité tardive, près d'Autun.

Une nécropole exceptionnelle à Autun

ARCHÉOLOGIE Des fouilles menées au cours de l'été 2020 ont permis de découvrir sur le site de l'ancienne Augustodunum (aujourd'hui Autun, en Saône-et-Loire) des objets qui pourraient avoir appartenu aux premiers chrétiens de Gaule. Parmi eux, un « vase diatrète » qui représente le summum de l'art du verre romain. Seuls 12 ont été trouvés à ce jour dans le monde. **M. B.**

SOURCE : CAROLE FOSSURIER, INRAP.

GENCI

Chercheurs académiques et industriels, boostez vos recherches par la simulation numérique !

GENCI, Grand Equipement National de Calcul Intensif, vous permet l'accès aux plus puissants supercalculateurs français : 1000 projets de recherche par an dont 400 en IA, ont recours à nos machines de calcul.

Un accès express et privilégié aux supercalculateurs GENCI a été mis au point depuis avril 2020 pour **40 projets engagés dans la lutte contre le Covid-19. Rejoignez-les.**

La TGIR* **GENCI** a pour mission, au niveau national et européen, de favoriser l'usage **gratuit** du calcul intensif associé à l'intelligence artificielle au bénéfice des communautés de recherche ouverte académique et industrielle.

GENCI possède 3 supercalculateurs nationaux hébergés et opérés par les centres de calcul souverains du CEA (TGCC), du CNRS (IDRIS) et des Universités (CINES).

Les moyens de calcul et de stockage de GENCI sont disponibles pour tous les domaines de la recherche et de défis sociétaux (santé/bien-être, numérique, transport, énergie, transition numérique, transition environnementale et énergétique) afin d'aider les chercheurs à booster leurs recherches.

*TGIR – Très Grande infrastructure de Recherche

Protéase majeure (Main protéase Mpro) du SARS-Cov2 simulée par dynamique moléculaire de nouvelle génération avec le logiciel Tinker-HP (https://doi.org/10.26434/chemrxiv.13003166.v1)

© Laboratoire de Chimie Théorique, Sorbonne Université

« Nous utilisons la simulation par dynamique moléculaire afin de modéliser les protéines du virus SARS-Cov-2. Notre objectif : comprendre les faiblesses structurelles du virus à un niveau atomique pour mieux le combattre. Notre challenge : calculer les arrangements possibles des atomes d'une protéine au cours du temps. C'est là qu'interviennent les supercalculateurs qui nous ont permis de modéliser en quelques jours à haute-résolution la protéase principale alors qu'il aurait fallu auparavant plusieurs siècles. » nous explique le Prof. Jean-Philip PIQUEMAL, Directeur du Laboratoire de Chimie Théorique, Sorbonne Université.

© Cyril FRESILLON / IDRIS / CNRS Photothèque

CE PROJET DE LUTTE CONTRE LE COVID-19 A UTILISÉ 40 000 HEURES GPU SUR LE SUPERCALCULATEUR JEAN ZAY (IDRIS).

Laboratoire de Chimie Théorique, Sorbonne Université, UMR CNRS 7616, France.
Laboratoire Jacques Louis Lions, Sorbonne Université, UMR CNRS 7598, France.
Laboratoire GBCMCNAM, Hésam Université, EA 7528, France.
Computational Biomolecular Engineering Laboratory,
Department of Biological Engineering, UT Austin, USA.

GENCI
Le calcul intensif au service de la connaissance

GENCI
6 bis Rue Auguste Vitu
75015 Paris
Tél. : 01 42 50 04 15
www.genci.fr
contact@genci.fr

Publi-communiqué

RAFFAELE SACCHI

Fabriquée il y a presque 2000 ans, l'huile était contenue dans ce flacon en verre.

Voici la plus vieille bouteille d'huile d'olive

Entreposée au musée d'archéologie de Naples, elle aurait été trouvée au XVIIIe siècle sur le site antique d'Herculanum.

ANTIQUITÉ La plus vieille bouteille d'huile d'olive du monde vient d'être identifiée… derrière une vitrine ! C'est en effet en déambulant dans le Musée archéologique national de Naples (MANN), en Italie, que le journaliste et paléontologue italien Alberto Angela s'est interrogé sur le contenu d'une bouteille en verre semblant être à moitié pleine. Une étude a alors été lancée sous la direction de Raffaele Sacchi, professeur au département d'agriculture de l'université de Naples-Frédéric II. Le verdict fut sans appel : les résidus s'apparentaient bien à *« l'échantillon d'huile d'olive le plus ancien trouvé en grande quantité »*. Très probablement exhumée au XVIIIe siècle sur le site de la cité antique d'Herculanum — détruite par l'éruption du Vésuve en l'an 79 après J.-C. —, cette huile fut donc fabriquée il y a presque 2000 ans. Le nectar n'aura donc pas eu le temps d'être dégusté avant la catastrophe… et sera resté bien trop longtemps sous la terre pour être aujourd'hui goûté, comme en témoignent les analyses chimiques qui révèlent une dégradation avancée. **M. B.**

LONGRICH ET AL.

Les fossiles d'*Ajnabia odysseus* ont été mis au jour au Maroc.

Les dinosaures à bec de canard vivaient aussi en Afrique

PALÉONTOLOGIE On avait identifié leurs fossiles sur tous les continents sauf l'Afrique : *Ajnabia odysseus* est le premier hadrosaure, ou dinosaure à bec de canard, à y être découvert. Son fossile, vieux de 66 millions d'années a été trouvé dans une mine au Maroc. **J. I.**

SOURCE : NICHOLAS LONGRICH, UNIVERSITÉ DE BATH, ROYAUME-UNI.

EN DEUX MOTS

VOL. L'université de Cambridge (Royaume-Uni) a lancé un appel pour retrouver deux carnets de notes de Darwin dérobés dans la bibliothèque de l'institution, dont l'un contient son esquisse d'arbre de la vie. **MUSIQUE.** Un chevalet en bronze découvert dans une sépulture mérovingienne du VIIe siècle va être reproduit et intégré à une reconstitution de lyre à six cordes. **ÉPAVE.** Un navire de recherche a identifié par 2400 m de fond au sud des îles d'Hyères (Var) un avion de l'aéronautique navale qui s'était abîmé en mer il y a 60 ans.

Quand les oiseaux avaient des dents

PALÉONTOLOGIE De la taille d'une corneille, *Falcatakely forsterae* possédait un bec allongé en forme de faucille — à la manière de ceux des actuels toucans — muni de dents : une singularité unique pour l'époque. Il a été découvert dans une coulée de boue datée de 68 millions d'années et située sur l'île de Madagascar. Cet oiseau appartenait à la famille des énantiornithes, des volatiles à l'apparence moderne aujourd'hui disparus. **J. I.**

SOURCE : PATRICK O'CONNOR. UNIVERSITÉ DE L'OHIO, ATHENS, ÉTATS-UNIS.

MARK WITTON

Falcatakely forsterae vivait il y a 68 millions d'années (vue d'artiste).

USF

La glace conservée dans les tunnels a fourni de l'eau aux Pueblos.

Les indiens Pueblos ont survécu grâce à des tunnels de lave

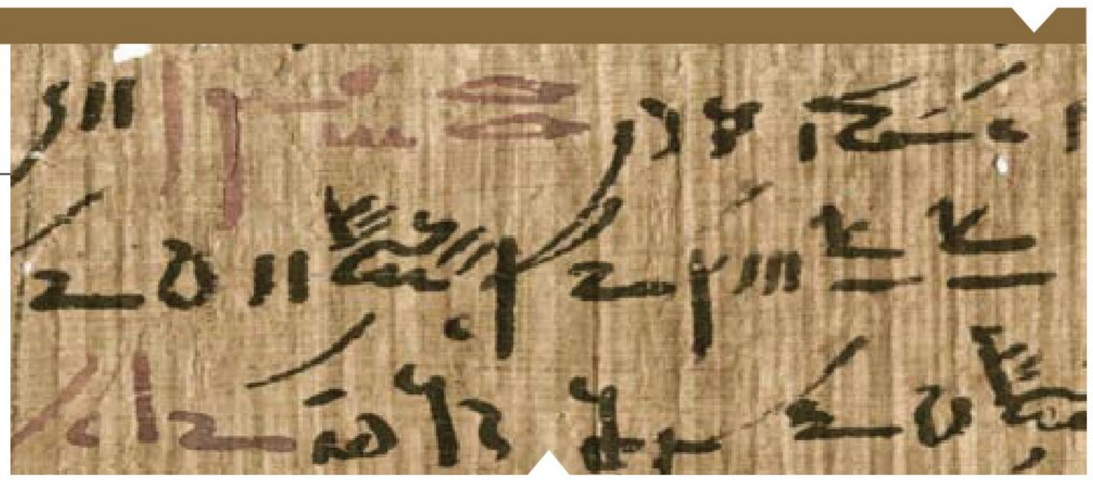
AMÉRIQUE PRÉCOLOMBIENNE En explorant un tube de lave au sein d'El Malpais National Monument, un site protégé du Nouveau-Mexique (États-Unis), des chercheurs ont pu déterminer que les anciens Indiens Pueblos s'y étaient profondément aventurés entre 150 et 900 de notre ère au moins. Ils y ont exploité la glace conservée à l'intérieur, qui leur aurait assuré une ressource en eau indispensable pour survivre lors d'au moins cinq épisodes de sécheresse. **M. B.**

SOURCE : BOGDAN ONAC, UNIVERSITÉ DE FLORIDE DU SUD, TAMPA, ÉTATS-UNIS.

Neandertal enterrait bien les siens

PALÉOANTHROPOLOGIE **Le réexamen du site de la Ferrassie (Dordogne) confirme que Neandertal creusait bien des sépultures pour ses morts, il y a 41 000 ans. Le fait que notre cousin disposait des capacités cognitives et comportementales nécessaires à l'inhumation des siens faisait débat depuis l'étude de fosses, dans les années 1920, dans lesquelles reposaient des individus juvéniles. R. M.**

SOURCE : ANTOINE BALZEAU, MUSÉE DE L'HOMME, PARIS.



THE PAPYRUS CARLSBERG COLLECTION

Détail d'un traité médical de la bibliothèque du temple de Tebtunis.

L'encre égyptienne séchait plus vite grâce au plomb

PAPYROLOGIE Des fragments de papyrus en provenance de la bibliothèque du temple de Tebtunis, produits entre 100 à 200 après J.-C., ont révélé que les encres noires et rouges contenaient du plomb. Il était utilisé comme siccatif, autrement dit pour accélérer le séchage de l'encre. Exactement comme les artistes européens… du XVe siècle. **M. B.**

SOURCE : THOMAS CHRISTIANSEN, UNIVERSITÉ PARIS-SORBONNE/CNRS.

387 Le nombre d'exemplaires connus de la première édition des *Principia*

HISTOIRE DES SCIENCES Le précédent recensement de l'œuvre phare du célèbre physicien anglais Isaac Newton — dans laquelle il énonce sa loi de la gravitation universelle —, en 1953, n'avait permis d'en identifier que 187. D'autres copies ont été retrouvées dans des librairies et des bibliothèques. L'estimation du tirage est passée de 250 à 750 exemplaires. **J. I.**

SOURCE : MORDECHAI FEINGOLD, CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, PASADENA, ÉTATS-UNIS.

CALTECH ARCHIVES

Une des copies détenue au XVIIIe siècle par le savant Jean-Jacques d'Ortous de Mairain.

L'IMAGE

Deux nouvelles victimes émergent des ruines de Pompéi

ANTIQUITÉ Les dépouilles de deux hommes morts en 79 pendant l'éruption du Vésuve ont été retrouvées dans une villa près de Pompéi. L'utilisation de la méthode de Giuseppe Fiorelli, consistant à mouler les corps pris dans les cendres, a permis de révéler leur dernière position. Selon l'étude des restes osseux, l'un était âgé de 30 à 40 ans, l'autre de 18 à 23 ans. **B. A.**

SIPA

www.sciencesetavenir.fr www.larecherche.fr

Sciences et Avenir et *La Recherche* au quotidien

TECHNO

Notre système solaire formé en moins de 200 000 ans ?

Une étude menée sur des météorites indique que l'effondrement du nuage protosolaire et la formation du disque d'accrétion du système solaire auraient pu se produire en moins de 200 000 ans. Marc Chaussidon, directeur de l'Institut de physique du globe de Paris commente ces travaux sur le site de **La Recherche** https://bit.ly/36Q7X4I

SCIENCE PHOTO LIBRARY

HISTOIRE

Le bilan des années VGE

L'ancien président de la République Valéry Giscard d'Estaing est mort le 2 décembre. L'énergie nucléaire, le TGV, la création du musée d'Orsay ou de la Cnil et, bien sûr, l'interruption volontaire de grossesse ont marqué son septennat, entre 1974 et 1981.
SCIENCES AVENIR sciav.fr/VGE887

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ…

2 minutes

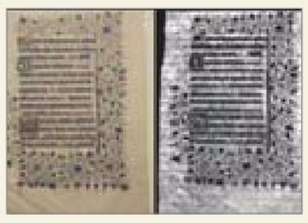
La « *Red Team* » de l'armée française

MINISTÈRE DE LA DÉFENSE

Dix auteurs de science-fiction ont été recrutés par l'armée pour imaginer les menaces et grands défis stratégiques du futur. leurs noms viennent d'être révélés. sciav.fr/Armée887

10 minutes

Découverte d'un texte manuscrit du XVe siècle



RIT

Des étudiants américains ont découvert, grâce à un système d'imagerie se fondant sur les ultraviolets, un texte caché dans un manuscrit datant du XVe siècle. sciav.fr/Manuscrit887

15 minutes

Une visite complète de Stonehenge

HEMIS.FR

Encore nimbé de mystères et de légendes, le monument anglais érigé à la période néolithique dévoile peu à peu ses secrets aux archéologues. sciav.fr/Stonehenge887

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

UNIVERS

Des scénarios de fin des temps

L'Univers prendra fin dans 10^{1100} années par un gigantesque feu d'artifice ! C'est l'hypothèse du « Big Freeze » décrit par un jeune théoricien américain. Avec le « Big Crunch », le « Big Slurp » et « Big Rip », les scénarios de fin des temps sont variés et ont tous l'intérêt de pousser la cosmologie dans ses derniers retranchements.

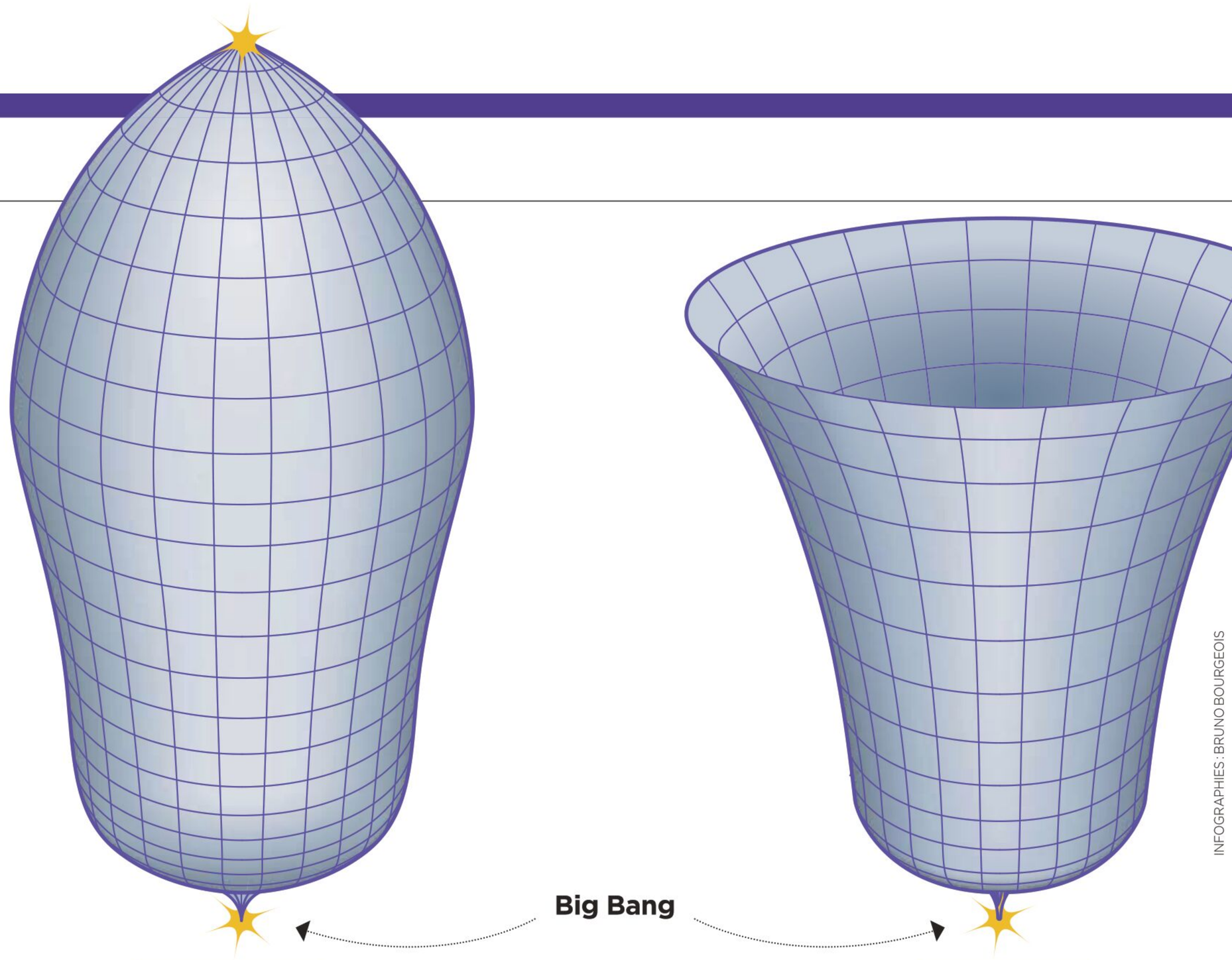
Dossier réalisé par
Azar Khalatbari et Fabrice Nicot
avec Marine Benoit et Franck Daninos

UN GIGANTESQUE FEU D'ARTIFICE ! Voilà à quoi pourrait ressembler la fin de l'Univers, marquée par une explosion fantastique d'étoiles, inconnues jusqu'alors, appelées naines noires. Une succession de formidables jets de matières... avant que tout ne s'éteigne et ne se fige à jamais. Ce scénario de la fin des temps, personne n'avait encore osé l'écrire ainsi, sinon le théoricien Matt Caplan, de l'université d'État de l'Illinois (États-Unis), qui vient de publier ses travaux dans la revue britannique *MNRAS* (*Comptes rendus mensuels de la société royale d'astronomie*). Pour ce faire, le scientifique a dégainé un arsenal théorique en accord avec les lois de la physique, mais riche en hypothèses décoiffantes, pour décrire le dernier événement astrophysique de l'Univers. Mais nul humain n'assistera à cette fête monstrueuse ! Car celle-ci surviendra lorsque l'Univers sera âgé de 10^{1100} années, soit un temps hors de toute imagination, proche de l'éternité ! En regard, les 13,8 milliards d'années (soit $13{,}8.\ 10^{9}$ années) de son âge actuel sont moins qu'un battement de cil.

Les travaux originaux de Matt Caplan s'inscrivent dans une longue recherche sur le

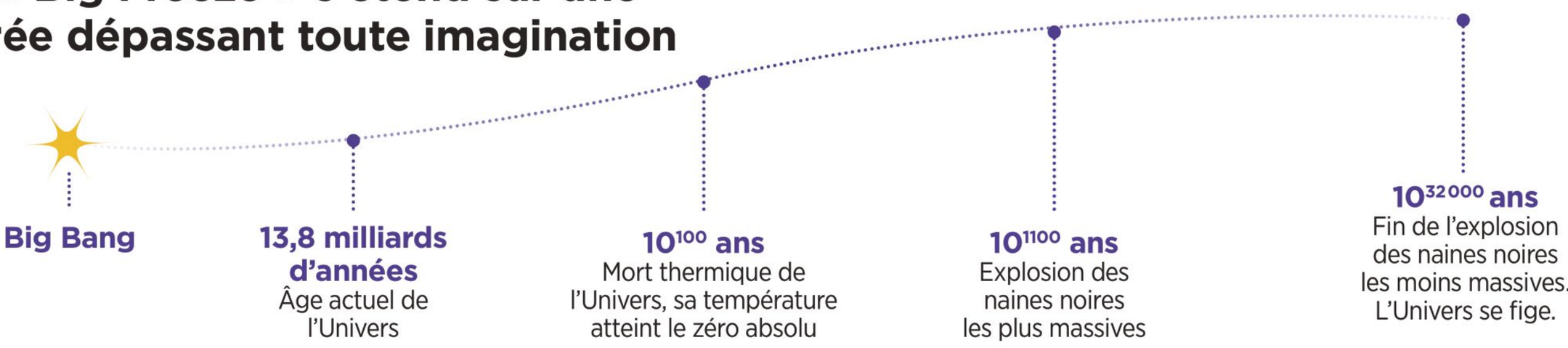
DIDIER FLORENTZ POUR SCIENCES ET AVENIR

Le scénario original conçu par le théoricien Matt Caplan décrit de gigantesques explosions avant que l'Univers ne se fige dans un grand gel (illustration de Didier Florentz pour « Sciences et Avenir »).



futur de l'Univers. Jusqu'au début des années 2000, les réflexions dans ce domaine étaient de deux types : soit le cosmos connaît un Big Crunch (un grand effondrement), soit il se fige dans un Big Freeze (un grand gel) *(voir schémas ci-dessus)*. Dans le premier scénario, après une période d'expansion, l'Univers s'effondre sur lui-même, pour atteindre un état extrêmement chaud et dense, similaire à celui qui avait cours aux toutes premières fractions de seconde de son existence. Dans le second, il connaît au contraire une expansion éternelle et un lent refroidissement. Deux hypothèses rendues possibles grâce à la cosmologie relativiste, celle née à la suite de la théorie d'Einstein au début du XX^{e} siècle. Car l'un des résultats les plus importants sur lequel se fonde cette discipline est que l'Univers est en expansion : l'espace se dilate, emporté par l'énergie héritée du Big Bang. Mais la matière, qui agit par la force gravitationnelle, s'y oppose. Et le résultat de ce bras de fer dépend, selon les théoriciens, de la densité moyenne de matière dans l'espace. Au-delà d'une certaine valeur appelée densité critique — estimée à quelques atomes par mètre cube d'espace —, la gravité devrait l'emporter sur l'expansion : c'est le Big Crunch ; en deçà, la gravité est vaincue par l'expansion devenant éternelle : c'est le Big Freeze. Mais coup de théâtre en 1998 ! Cette année-là, les astrophysiciens prouvent que l'expansion va en s'accélérant, signe qu'un ingrédient inconnu jusque-là domine le contenu de l'Univers. Parmi les suspects, une énigmatique énergie noire. Dès

Le « Big Freeze » s'étend sur une durée dépassant toute imagination



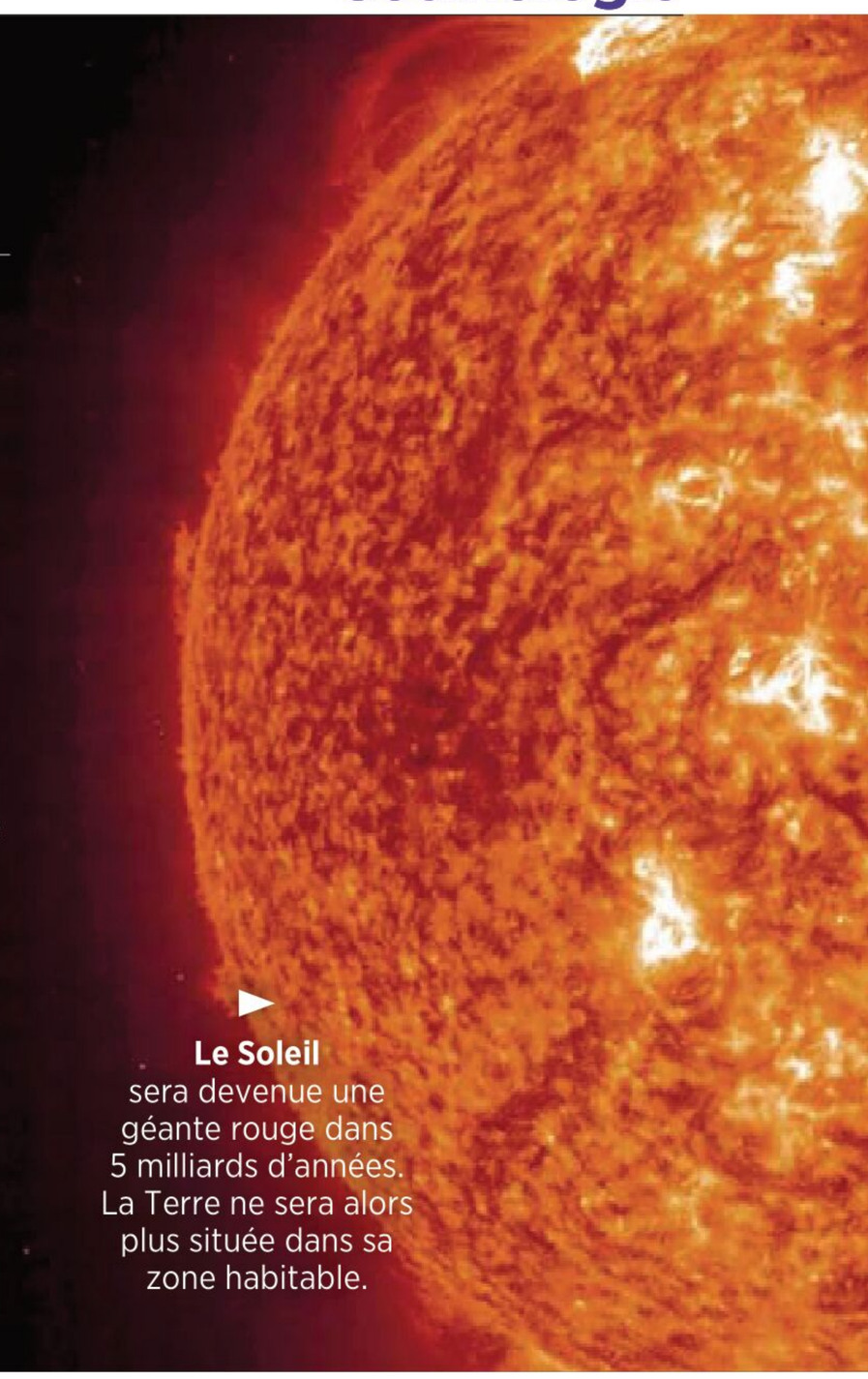
SIMULATIONS

Et la Terre ? 5 milliards d'années, pas plus !

Si l'humanité existe encore dans environ 5 milliards d'années, elle aura tout intérêt à migrer — si elle le peut ! — sur les lunes de deux géantes gazeuses, vers le système solaire extérieur : Europe, satellite de Jupiter, qui renfermerait sous sa croûte de glace de l'eau liquide ; et Encelade, satellite de Saturne, qui posséderait des geysers actifs. Car la Terre sera invivable. Le Soleil étant devenu une « géante rouge », la planète bleue, telle que nous la connaissons ne sera plus située dans la « zone d'habitabilité » du système solaire, comme est appelée la région située autour d'une étoile, à une distance telle que l'eau peut être à l'état liquide. Cette zone se sera alors déplacée du côté de Jupiter et Saturne selon le résultat publié dans *Astrophysical Journal* par une équipe de l'institut Carl Sagan (États-Unis) (1).

Ce sera le moment où le Soleil, qui s'est formé il y a 4,6 milliards d'années et qui tire son énergie des réactions de fusion qui convertissent son hydrogène en hélium, verra ce processus prendre fin : son cœur d'hélium s'effondrera, ce qui entraînera un échauffement conduisant à la fusion des éléments chimiques plus lourds. Ses couches superficielles se dilateront au point d'atteindre un diamètre une centaine de fois supérieur à l'actuel, englobant les orbites de Mercure (située à 0,31 unités astronomiques, UA) (2) et Vénus (0,47 UA) et les pulvérisant littéralement.
La Terre (1 UA) fera-t-elle partie du lot ? Les simulations ne peuvent pas encore trancher.

(1) sciav.fr/887Cornell
(2) 1 unité astronomique représente la distance Terre-Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres.



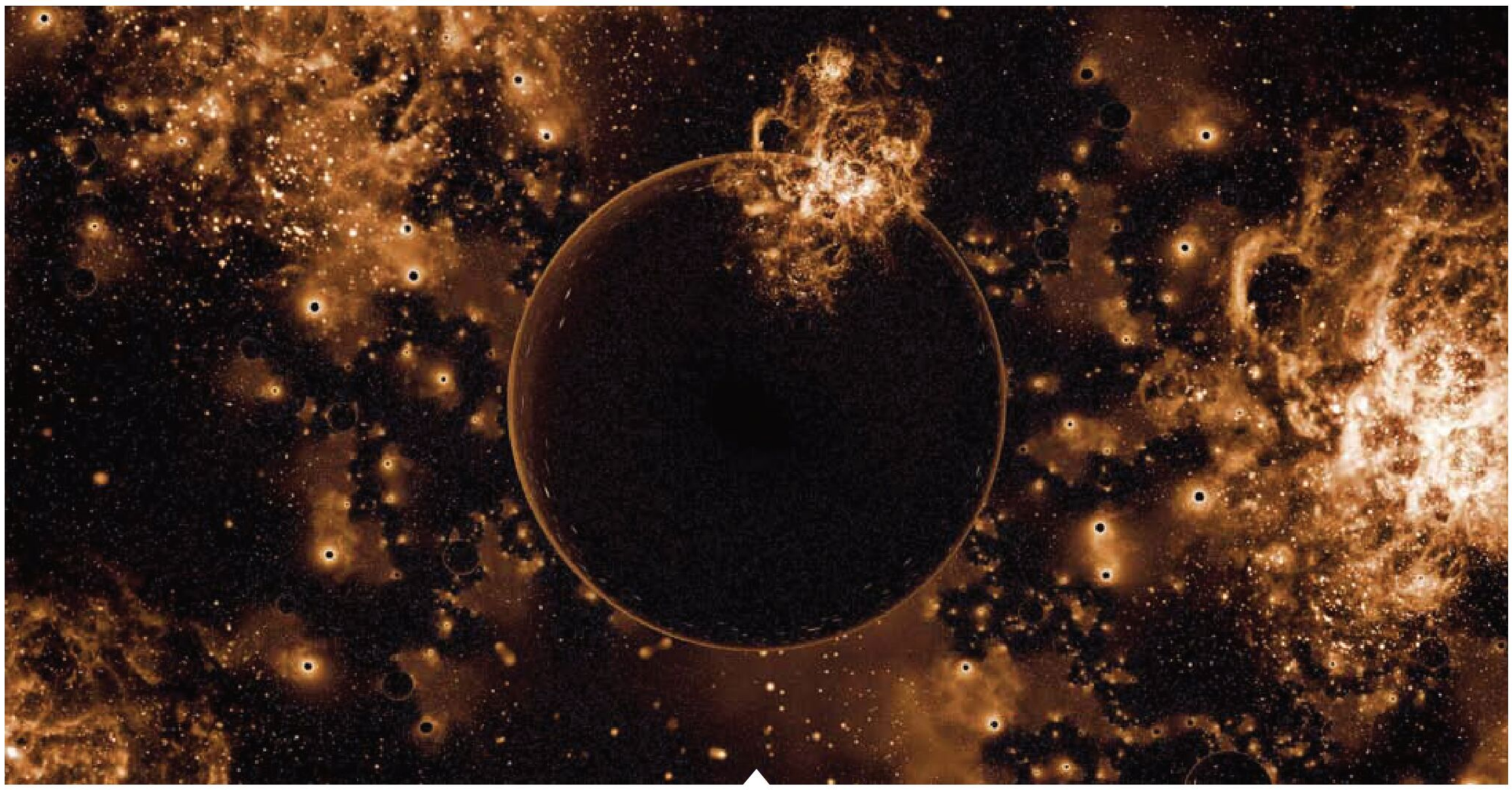
Le Soleil sera devenue une géante rouge dans 5 milliards d'années. La Terre ne sera alors plus située dans sa zone habitable.

SOHO (ESA & NASA)

lors, le scénario du Big Crunch s'effondre, au profit du Big Freeze devenu le futur le plus probable de l'Univers.
Pour en connaître les échéances, il faut en savoir plus sur la nature de cette fameuse énergie noire et mieux comprendre l'évolution des galaxies et des étoiles. C'est précisément le point de départ du travail de Matt Caplan. « *Il commence à explorer le champ des possibles avec des hypothèses concernant l'évolution des étoiles, des pistes qui échappent à la simulation numérique parce que les phénomènes physiques en jeu sont extrêmement lents* », explique Jean-Philippe Uzan, cosmologiste au CNRS et à l'institut d'Astrophysique de Paris. Le début du scénario est bien balisé : sous l'effet de l'expansion, le cosmos devient de plus en plus froid et de moins en moins dense. Il ne parvient plus à former des galaxies et celles-ci ne donnent plus naissance à de nouvelles étoiles. L'Univers est alors âgé de 10^{100} ans et dans cet espace qui s'étire et gonfle, la température diminue progressivement jusqu'à atteindre le zéro absolu (-273,15 °C), la température la plus basse autorisée par la physique. C'est la mort thermique. Les galaxies se disloquent et les étoiles s'éparpillent.

Le devenir des étoiles décidera du sort de l'Univers

Le devenir de ces dernières va être déterminant pour la suite. Considérons d'abord les plus massives : selon le modèle standard, ces étoiles peuvent fabriquer en leur cœur, grâce à des réactions de fusion nucléaire, des éléments chimiques de plus en plus lourds jusqu'au fer dont elles ne parviennent pas à entamer la fusion. Résultat : elles explosent en supernovae. Leur enveloppe extérieure est rejetée tandis que leur cœur persiste sous forme d'un astre très compact, une étoile à neutrons ou un trou noir qui vont eux-mêmes évoluer. « *Si l'on croit l'hypothèse du physicien britannique Stephen Hawking, les trous noirs finissent par s'évaporer totalement grâce à un processus quantique*, rappelle Jean-Philippe Uzan. *C'est ainsi que Roger Penrose, prix Nobel de physique 2020, envisageait le futur de l'Univers, composé essentiellement de rayonnement, semblable à ce qu'il était au cours des premières fractions de seconde de son existence, d'où ses spéculations sur un nouveau cycle cosmique.* » (*Lire p. 36.*)
Reste la ribambelle d'étoiles dont la masse ne dépasse pas une dizaine de fois celle du Soleil. Ces dernières vivent bien plus longtemps que leurs cousines massives et évoluent en naines blanches, ne parvenant pas à fabriquer des éléments plus lourds que le carbone et l'oxygène. De ce fait, chez elles, rien qui soit susceptible de provoquer une explosion. Elles finissent par se refroidir très doucement… Mais, à ce stade, le chercheur américain Matt Caplan émet de nouvelles hypothèses ! Un grand nombre d'entre elles



MEHAU KULYK/SPL

Les naines noires, imaginées par Matt Caplan, sont des astres hypothétiques car notre Univers serait bien trop jeune pour en abriter (illustration).

deviendraient des naines noires, un type d'étoile inconnu qu'aucun astronome n'a observé à ce jour. « *Car le processus indispensable à leur formation nécessite des phénomènes physiques improbables qui s'inscrivent dans le temps long* », estime Jean-Philippe Uzan, et notre Univers est encore beaucoup trop jeune pour que de tels processus aient eu le temps d'aboutir.

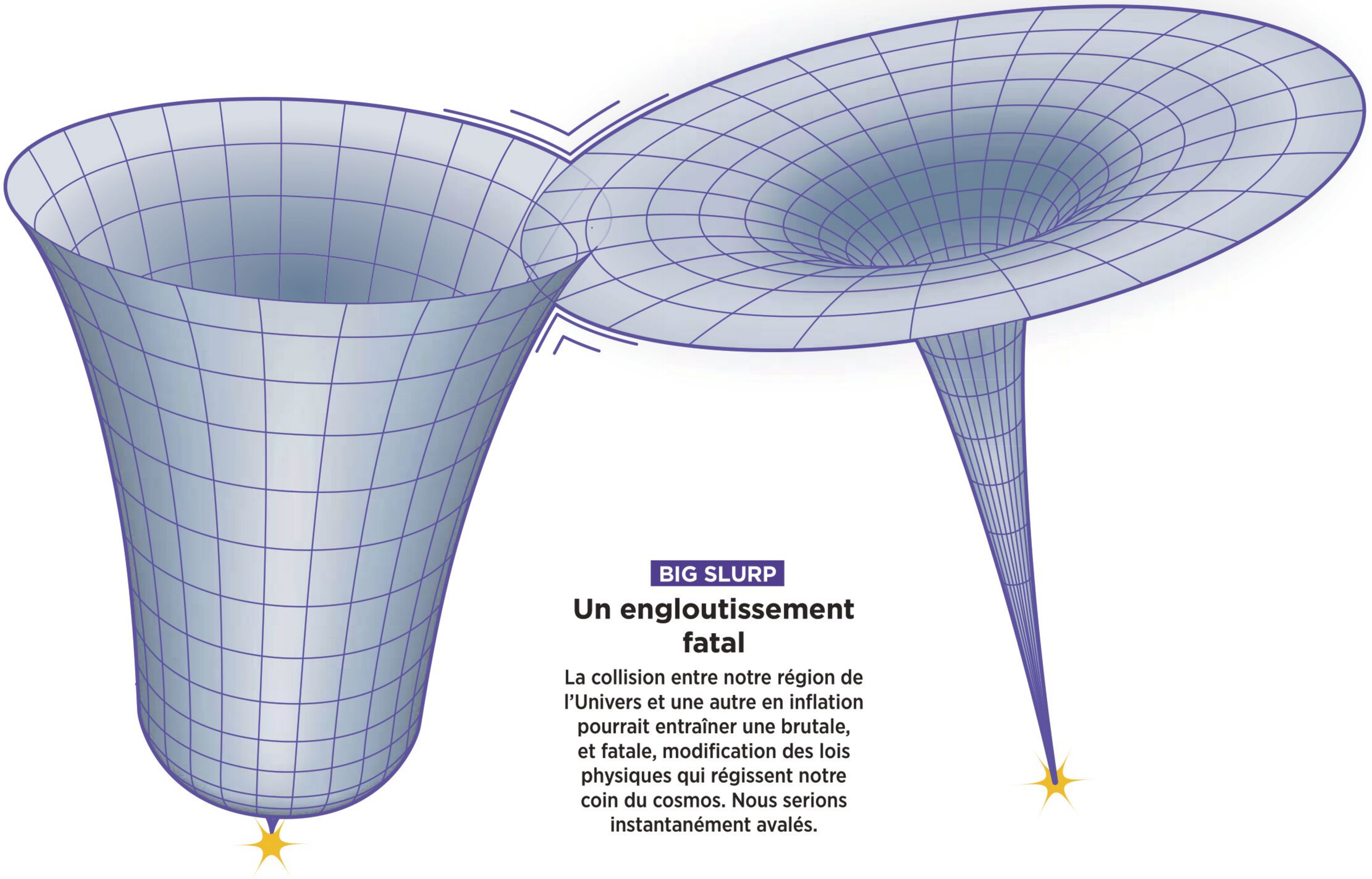
Effet quantique pour une fusion nucléaire à -273,15 °C

Matt Caplan a son idée : « *Lors de leur refroidissement progressif au cours de milliards d'années, les naines blanches vont s'assombrir puis geler et devenir des naines noires qui ne brillent plus. Des astres de la taille de la Terre qui renferment l'équivalent de la masse du Soleil* », a-t- expliqué lors d'une conférence. Ce qui n'exclut pas, selon lui, que des réactions de fusion puissent continuer. Une hypothèse surprenante, car, au sein des étoiles, les réactions de fusion ne débutent que lorsque la température atteint des millions de degrés, alors que la température de ces naines noires est proche du zéro absolu. Mais le théoricien souligne que des processus quantiques, comme le fameux « effet tunnel », pourraient expliquer cette fusion à très basse température. Il s'agit de la possibilité pour une particule de franchir un niveau d'énergie plus élevé que sa propre énergie. Un événement improbable... sauf que plus on attend longtemps — 10^{1100} ans par exemple —, plus sa probabilité augmente. Aussitôt la fusion entamée, la naine noire fabriquerait des éléments de plus en plus lourds jusqu'au fer... et exploserait. Ce serait le coup d'envoi du feu d'artifice final... à condition que les particules participant à cette réaction de fusion à froid existent encore. « *L'une des interrogations de la physique d'aujourd'hui concerne justement la durée de vie du proton*, précise Jean-Philippe Uzan. *Pour l'heure nous savons seulement qu'elle est supérieure à 10^{29} ans. Rien ne nous dit que cet ingrédient du noyau atomique sera encore là lorsque l'Univers aura 10^{1100} ans.* » Qu'à cela ne tienne ! Matt Caplan a fait ses calculs : les naines noires les plus massives exploseront en premier vers 10^{1100} ans, et ainsi de suite jusqu'aux moins massives. Un feu d'artifice qui prendra fin lorsque l'Univers aura atteint l'âge de... $10^{32\,000}$ ans. Après ? Calme plat et silence complet. ■ **A. Kh.**

MATT CAPLAN

« Lors de leur refroidissement progressif, les naines blanches vont s'assombrir puis geler et devenir des naines noires »

Matt Caplan, professeur assistant de physique à l'université d'État de l'Illinois, à Normal (États-Unis)



BIG SLURP

Un engloutissement fatal

La collision entre notre région de l'Univers et une autre en inflation pourrait entraîner une brutale, et fatale, modification des lois physiques qui régissent notre coin du cosmos. Nous serions instantanément avalés.

Trois autres scénarios de fin du monde

Voici trois destins funestes aux charmes variés : des particules qui deviennent des poids lourds, un écartèlement généralisé, un rebond salvateur après une phase d'écrasement.

« Big Slurp », « Big Rip », « Big Bounce » Toutes les fins possibles de l'Univers sont « big » [grandes], mais ne ressemblent pas. Ces issues sont, certes, moins probables que le « Big Freeze » *(lire p. 30)*, mais elles ont l'intérêt de pousser la cosmologie dans ses retranchements.

1. Le Big Slurp ou la grande absorption

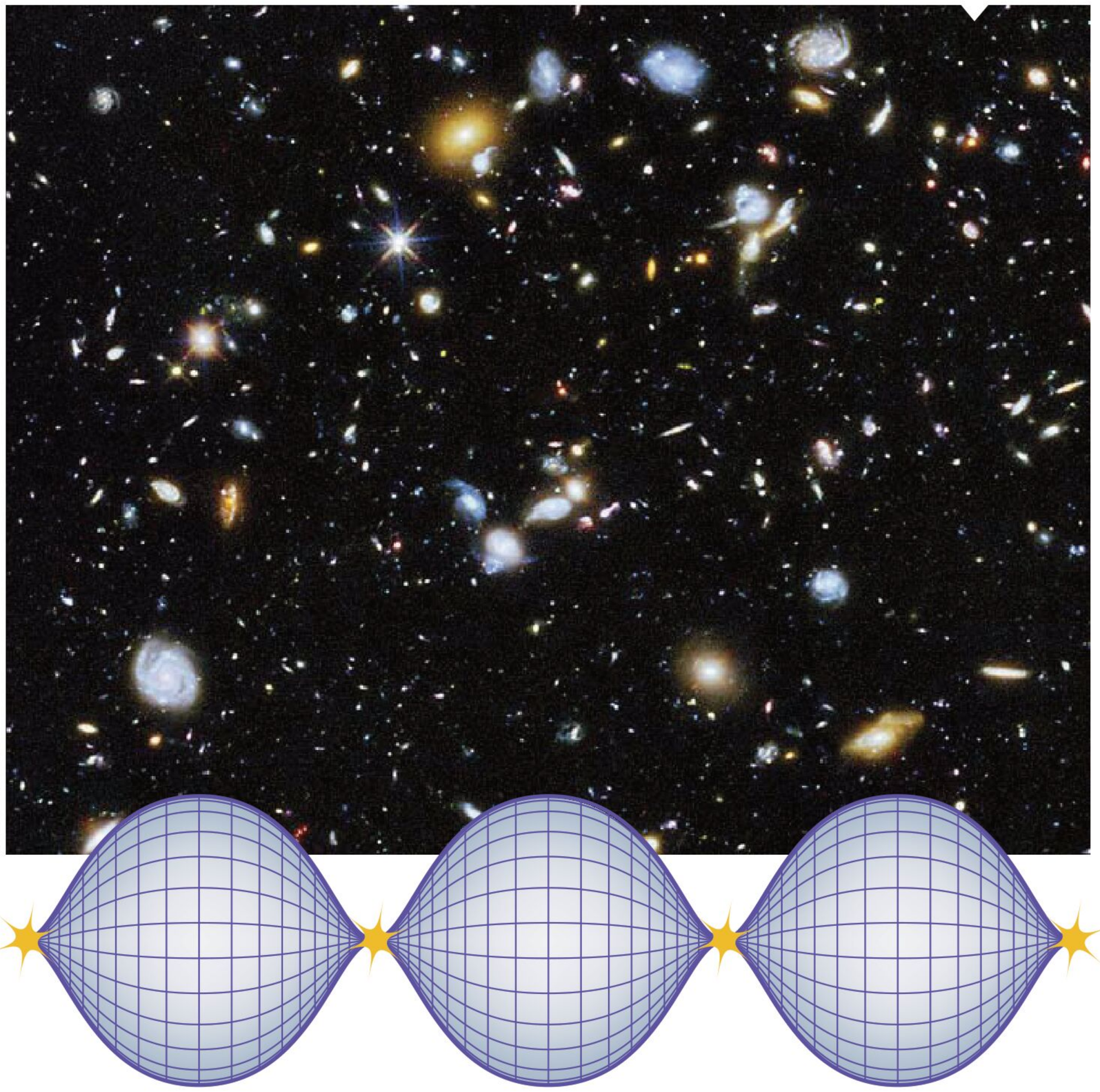
L'avantage est que nous, humains, ne sentirons rien à l'instant fatal. L'inconvénient, c'est qu'il peut se produire… n'importe quand ! « Slurp », c'est le bruit que l'on fait en avalant une cuillerée de soupe. Et il s'agit bien de cela. Dans ce drôle de scénario, notre région d'univers serait engloutie par une autre, à la vitesse de la lumière. Pour comprendre, il faut revenir 10^{-35} seconde après le Big Bang. L'Univers à peine né connaît alors une inflation formidable, durant laquelle sa taille est multipliée de ▸

l'ordre de 10^{29} fois. L'origine de cette croissance exponentielle est toujours discutée, mais l'une des hypothèses repose sur l'existence d'un champ scalaire, dont on ignore encore la nature physique concrète, mais qu'il faut voir comme une source d'énergie baignant l'Univers primordial. Il exerce sur son environnement une pression négative, contrairement à la matière ordinaire dont la pression est toujours positive. Si les chercheurs injectent ce champ dans les équations de la relativité générale, qui relie la géométrie de l'espace-temps à la matière et à l'énergie qu'il renferme, ils montrent alors qu'il provoque bel et bien une expansion accélérée de l'Univers.

« *Mais cette inflation est de très courte durée*, précise Jérôme Martin, chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris. *En effet, pour que la pression soit négative, il faut des conditions énergétiques particulières, avec une énergie potentielle du champ supérieure à son énergie cinétique. Avec l'inflation, l'énergie potentielle diminue puis lorsque cette dernière équivaut à l'énergie cinétique, l'inflation cesse : une partie de l'énergie du champ scalaire se convertit alors en matière. C'est ce qui s'est passé pour notre univers. Toutefois, ces mêmes modèles n'excluent pas qu'en certains endroits, cette égalité ne soit jamais atteinte. Dans ce cas, l'inflation s'y poursuivrait éternellement.* » Résultat : un « Big Slurp », qui correspondrait à la collision entre une de ces parties de l'Univers en pleine inflation et la nôtre. « *L'ennui, c'est que cette région de l'Univers n'aurait sans doute pas les mêmes lois physiques que la nôtre*, remarque Alain Riazuelo, chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris. *Les constantes fondamentales de la physique dépendent de la valeur du champ scalaire dans la bulle d'inflation. Or, ce champ étant fluctuant, rien ne dit que sa valeur serait identique à celle qui prévalait lors de notre inflation* ». De cette rencontre entre deux portions d'univers aux lois physiques différentes ne sortira qu'une seule gagnante… « *La région la plus stable devrait "avaler" l'autre à la vitesse de la lumière* », assure l'astrophysicien.

Cette théorie a pris une importance particulière avec la découverte du Boson de Higgs en 2012. Cette particule, responsable de la masse de toutes les autres, est justement la manifestation d'un champ scalaire, le tout premier découvert. Est-ce celui à l'origine de l'inflation ? Pour l'instant, ce candidat tient la corde. Ce qui pourrait avoir quelques inconvénients fatidiques… En effet, à partir de la masse du boson de Higgs, il est possible de calculer le niveau d'énergie fondamental du champ scalaire associé. Les calculs ont montré que le champ de Higgs peut se trouver dans deux énergies fondamentales, l'une basse dans laquelle il se trouve aujourd'hui, et une autre bien plus élevée. Or, il pourrait passer spontanément

Le champ profond de l'Univers, photographié par le télescope spatial Hubble, montre un grand nombre de galaxies dans une petite portion de l'espace. Avec le Big Bounce, toute cette matière connaîtra une phase de contraction, jusqu'à tenir dans un espace beaucoup plus petit qu'un dé à coudre…

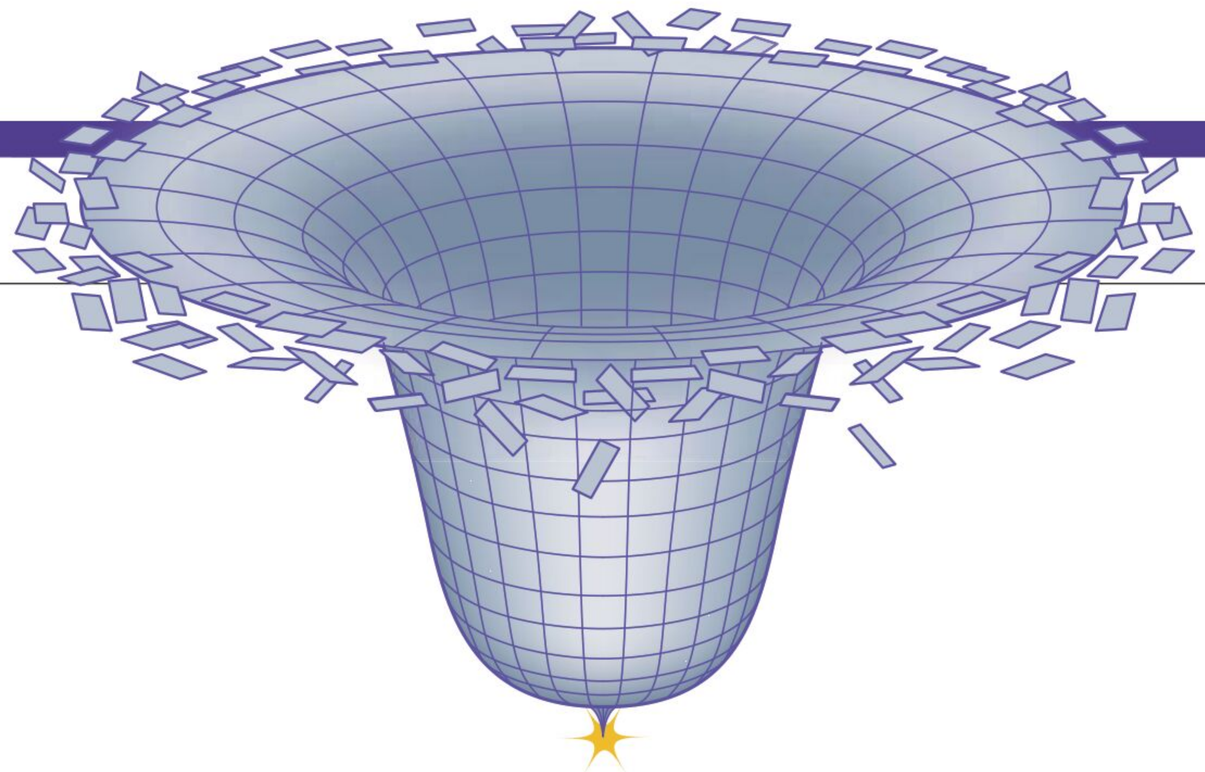


NASA, ESA, STSCI

BIG BOUNCE

Une succession de rebondissements

Selon la théorie de la gravitation quantique à boucles, notre Univers serait issu de la contraction d'un précédent. Pourquoi, dans ce cas, ne serions-nous pas nous-mêmes amenés à « rebondir » un jour ?



BIG RIP

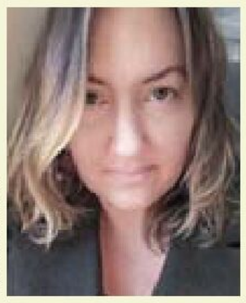
Une dislocation des galaxies jusqu'aux atomes

Si la force à l'origine de l'expansion actuelle de l'Univers se renforçait au fil du temps, elle finirait par tout dilater, jusqu'aux atomes eux-mêmes ! Tout finirait éparpillé « façon puzzle ».

d'un état à l'autre... Ce qui entraînerait un changement brutal de la masse de toutes les particules. Et finalement, un bouleversement de la physique telle que nous la connaissons. « *Le "slurp" viendrait "de l'intérieur" en quelque sorte, et pas d'une collision extérieure* », résume Alain Riazuelo. L'anéantissement serait tout aussi rapide.

2. Le Big Rip ou la Grande Déchirure

Comme son nom l'indique, « la Grande Déchirure » n'augure rien de bon. Une sorte de gigantesque écartèlement ! « *Contrairement au Big Slurp, d'éventuels témoins de cette catastrophe* [si l'humanité avait réussi à quitter la Terre devenue invivable *(lire p. 31)*] *auraient malheureusement tout le loisir de la voir arriver*, décrit Alain Riazuelo. *Dans un premier temps, les étoiles s'éloigneront de plus en plus rapidement les unes des autres, entraînant le délitement des galaxies. Puis ce sera au tour des planètes de quitter leur orbite. Enfin, tous les corps se disloqueront, jusqu'aux atomes eux-mêmes.* » Quel programme ! En fait, ce serait l'emballement d'un phénomène déjà à l'œuvre : l'accélération de l'expansion de l'Univers, mise en évidence en 1998 par Saul Permutter et Adam Riess, prix Nobel de physique en 2011. Depuis, différents modèles tentent d'expliquer cette accélération. L'un d'eux, imaginé par le cosmologiste américain Robert Caldwell et publié en 2003, envisage l'existence d'une énergie « fantôme » baignant l'Univers tout entier et dont la pression négative dilaterait celui-ci, agissant comme une force répulsive. Jusqu'à présent, cela ressemble à l'énergie noire, très en vogue pour expliquer les observations de 1998. Mais dans ce cas particulier, la densité d'énergie augmenterait au fil du temps. Elle deviendrait tellement forte qu'elle disloquerait jusqu'aux quarks constituant les protons et les neutrons. L'Univers finirait éparpillé « façon puzzle ». Est-ce probable ?
La clé pour le savoir se niche dans les caractéristiques de l'accélération actuelle de l'expansion de l'Univers. Et notamment la constante de Hubble, qui détermine le taux d'expansion. Sa valeur fait aujourd'hui l'objet de plusieurs estimations, sans qu'il y ait consensus. Toutefois, certaines d'entre elles, les plus élevées, ne sont pas incompatibles avec le Big Rip. « *En fait*, conclut Alain Riazuelo, *les propriétés de l'expansion accélérée que l'on connaît sont à la limite entre une densité d'énergie diminuant avec le temps, et une densité augmentant. On privilégie* a priori *la première option, mais aujourd'hui rien ne permet vraiment de trancher.* » La Grande Déchirure n'est peut-



M. GUEGUEN

QUESTIONS À...

MARIE GUÉGUEN

PHILOSOPHE DES SCIENCES À L'INSTITUT ROTMAN DE PHILOSOPHIE DE L'UNIVERSITÉ D'ONTARIO OCCIDENTAL (CANADA)

« C'est rassurant de modéliser l'évolution de l'Univers »

De récents calculs repoussent la fin de l'Univers de 10^{100} à $10^{32\,000}$ années. Quels sont les implications philosophiques de tels travaux ?
Elles pourraient sembler vertigineuses mais n'ont rien de comparable avec les bouleversements suscités par la révolution copernicienne du XVII[e] siècle ou la théorie du Big Bang à partir des années 1960. Dans le premier cas, nous sommes passés d'un monde clos centré sur les humains et la Terre à un cosmos infini où notre place devenait beaucoup plus difficile à penser. Dans le second, il a fallu échanger un univers sans limites et éternel par un autre qui avait surgi de « quelque chose » et en constante expansion. La question se pose, depuis lors, de la « fin » de cette évolution. Mais le fait de décaler, de 10^{100} à $10^{32\,000}$ années, les derniers événements astrophysiques notables ne constitue pas un renversement philosophique majeur. Car on ne fait que repousser un ordre temporel — une limite — déjà inconcevable par la pensée.

Ces questionnements sont-ils néanmoins légitimes ?
La raison humaine ne peut s'empêcher de se poser des questions métaphysiques sur le début ou la fin de l'Univers, même si elle bute sur des difficultés insolubles et devient un abîme pour elle-même. Cette propension participe aussi à pousser nos théories à leurs limites de validité, comme les tout premiers instants de l'Univers ou les conditions de sa fin supposée. Nous n'avons pourtant aucune réponse claire sur la manière dont la relativité générale, fondement de notre modèle cosmologique actuel, se comporte à de tels extrêmes. Il devient alors difficile de distinguer ce qui relève ou dépasse du cadre légitime d'un travail scientifique. Une telle démarche alimente plutôt notre quête de sens et offre à la raison humaine la nourriture dont elle est en demande. Il y a par ailleurs quelque chose de rassurant à imaginer que nous pourrions modéliser l'évolution de l'Univers. On retrouve ainsi, grâce à la science, un moyen d'agir sur la nature et ce qui nous échappe. ■

Propos recueillis par F. D. @fdaninos

JEAN-PHILIPPE UZAN COSMOLOGISTE

« L'astronome du futur aura au-dessus de lui un ciel de plus en plus sombre »

Dans une centaine de milliards d'années, notre ciel sera vide de galaxies, affirme Jean-Philippe Uzan, chercheur au CNRS et à l'Institut d'astrophysique de Paris.

« Pour décrire les phases primordiales de l'Univers, il faut extrapoler les lois de la nature à haute énergie et se confronter à la singularité cosmologique. Mais imaginer son futur nécessite de comprendre de nombreux processus, cosmiques, galactiques et stellaires. Il est aujourd'hui établi que l'expansion cosmique s'accélère : les galaxies se dispersent et sortent de notre univers observable. Dans une centaine de milliards d'années, notre ciel sera vide de galaxies. Un astronome de ce futur — si tant est que l'humanité existe toujours — ne pourra plus en observer. Il lui deviendra alors impossible de prouver que l'Univers est en expansion ou de le dater, ou encore de comprendre l'origine de la Voie lactée. Cette civilisation sera perdue au milieu d'un ciel vide contenant une seule galaxie : la sienne. Celle-ci aura par ailleurs de moins en moins d'étoiles, et donc de moins en moins de sources d'énergie. En effet, la Voie lactée produit de moins en moins d'étoiles — quelques masses solaires par an aujourd'hui contre une centaine dans sa jeunesse — et elle perd continûment des étoiles. Notre astronome du futur aura au-dessus de lui un ciel de plus en plus sombre, peuplé principalement de naines blanches ou brunes,

NERISSA ESCANLAR

KATIE MACK ASTROPHYSICIENNE

« Explorer les scénarios d'évolution future du cosmos peut nous orienter vers de nouvelles idées »

En étudiant des théories plus exotiques, nous pourrions obtenir un point de vue inédit sur la matière noire, explique cette chercheuse à l'université d'État de Caroline du Nord (États-Unis).

« À l'heure actuelle, nous ignorons toujours de quoi sont faites la matière et l'énergie noires, deux composantes encore hypothétiques de l'Univers. Il va sans dire que si nous parvenions à obtenir ces données, nous pourrions acquérir des connaissances incroyablement utiles sur la structure, le fonctionnement et — peut-être — la façon dont mourra le cosmos ! Mais nous en savons déjà beaucoup sur leur fonctionnement. Dans le cas de la matière noire, nous savons par exemple où elle se trouve — au sein des galaxies et entre ces dernières, à l'échelle des amas — et quel a été jusqu'à présent son rôle dans

d'étoiles à neutrons et de trous noirs dont, théoriquement, il peut espérer extraire de l'énergie. Mais on peut imaginer sa solitude sur une île perdue au milieu d'un néant froid et sombre sans pouvoir contempler cette forêt de galaxies et d'étoiles qui nous a permis de comprendre l'Univers, mais aussi de rêver que la vie existe ailleurs ! Extrapoler sur un temps encore plus long, au-delà de centaines de milliards d'années, nécessite alors de faire des hypothèses sur la stabilité du proton et sur l'évaporation des trous noirs. Les scénarios deviennent dès lors beaucoup plus spéculatifs. » ■

Propos recueillis par A. Kh.

PHILIPPE MATSAS/LEEXTRA

l'évolution de l'Univers. Quant à l'énergie noire — ou sombre — nous comprenons la façon dont elle se comporte, du moins suffisamment pour faire des déductions solides sur la manière dont elle agira probablement dans un futur lointain. Alors certes, beaucoup d'incertitudes planent encore et continueront à planer encore longtemps, mais ce n'est pas parce que la nature d'une chose nous échappe que nous ne pouvons pas cerner la façon dont elle agit. Parallèlement, explorer les scénarios d'évolution future du cosmos peut nous orienter vers de nouvelles idées… ou nous aider à mieux analyser les anciennes. Après tout, c'est ainsi que nous avons pris conscience de l'existence de cette énergie sombre, en tentant d'imaginer le futur de notre Univers dont on pensait il y a encore moins de vingt-cinq ans que l'expansion ralentissait ! Personne ne s'attendait à découvrir le contraire et à identifier une forme d'énergie inconnue se comportant comme une force gravitationnelle répulsive. De la même manière, en étudiant des théories plus exotiques, ou disons moins probables, nous pourrions en apprendre davantage sur les rouages de la physique des hautes énergies et peut-être obtenir un point de vue inédit sur la matière noire. Je suis convaincue qu'à chaque fois que nous osons repousser les limites de notre connaissance et de notre compréhension, nous ouvrons l'horizon des possibles. » ■ **Propos recueillis par M. B.** @marin_eben

- être pas une fatalité, mais elle reste une option… Dans quelques dizaines de milliards d'années, heureusement !

3. Le Big Bounce ou le Grand Rebond

Dans l'hypothèse du « Grand Rebond », l'Univers, après une phase d'expansion, ferait machine arrière ! Mais contrairement au Big Crunch *(lire p. 28)*, c'est un univers tout neuf qui jaillirait de ce nouveau Big Bang ! Pour l'instant, l'expansion s'accélérant, notre univers n'en prend pas le chemin. Pour que cette dernière s'inverse, il faudrait en effet que la force qui dilate l'Univers change radicalement de nature, et les chercheurs en savent encore trop peu sur elle pour spéculer. Il n'empêche que la théorie du rebond est née d'une démarche intéressante : décrire ce qui s'est passé au moment du Big Bang. En effet, la seule relativité générale décrit un Univers infiniment petit, doté d'une densité d'énergie infiniment grande, ce qui est impossible.
Pour décrire correctement cet instant si particulier du Big Bang, les chercheurs doivent alors recourir à la physique quantique. Et les tentatives sont nombreuses. Parmi elles, la théorie de la gravitation quantique à boucles, développée par l'Américain Lee Smolin et l'Italien Carlo Rovelli notamment, postule un espace-temps quantifié, le quantum d'espace ne pouvant descendre en dessous de 10^{-35} mètre. L'Univers à ses débuts était donc très étroit, mais pas infiniment petit. En suivant ce modèle jusqu'au bout, les chercheurs ont établi que… le Big Bang disparaît tout à fait ! Dans ce scénario, l'Univers serait issu du stade final d'un précédent en contraction. Dès lors, pourquoi notre Univers, à son tour, ne serait-il pas l'ancêtre d'un prochain cosmos ? ■ **F. N.** @fnicot07

Arecibo n'écoutera plus le ciel

Stupeur ! Le gigantesque radiotélescope s'est écroulé début décembre, n'ayant pas résisté aux ouragans qui ont frappé l'île de Porto Rico. De la traque des astéroïdes jusqu'à l'étude des pulsars, retour sur les prouesses de cet instrument unique.

Par Franck Daninos @fdaninos

« *C'est une catastrophe. Une perte immense pour la science* », se désole Alain Lecacheux, astronome à l'observatoire de Paris. « *La fin d'une prodigieuse aventure humaine et scientifique qui aura duré près de soixante ans et permis tant de découvertes capitales* », déplore Alain Hérique, chercheur à l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble. Depuis le 1er décembre, jour où le radiotélescope d'Arecibo s'est effondré sur lui-même, la communauté scientifique, sous le choc, pleure un géant de l'astronomie. Il était l'un des plus performants au monde et sans nul doute le plus célèbre, une icône de la pop culture apparaissant dans de nombreux films et séries télé de science-fiction *(lire p. 41)*. Et, surtout, avait contribué à de nombreuses découvertes.

Gravement endommagé par la rupture récente de deux câbles porteurs voilà quelques mois, il a été jugé irréparable par son propriétaire, la Fondation américaine pour la science (NSF), qui

Les 900 tonnes des instruments du télescope au-dessus de la parabole de 305 mètres de diamètre se sont effondrées le 1er décembre en quelques secondes après la rupture des câbles (ci-dessus à droite, vue aérienne du télescope avant la catastrophe).

PHOTOS : RICARDO ARDUENGO/AFP - SCIENCE PHOTO LIBRARY/SETH SHOTA

Un demi-siècle de découvertes majeures

1963 — Mise en service du radiotélescope.

1967 — La période de rotation de Mercure, que l'on pensait être de 88 jours, est ramenée à 59 jours.

1974 — Un message radio est envoyé à d'hypothétiques civilisations extraterrestres.

1989 — Première image d'un astéroïde, Castalie, qui a la forme d'une cacahouète.

1992 — Les premières planètes extrasolaires sont identifiées.

1993 — Le Nobel de physique récompense la découverte du premier pulsar binaire.

2016 — Détection des premiers sursauts radio rapides répétés, à 3 milliards d'années-lumière de la Terre.

a pris fin novembre la décision de le démolir. Ce sera donc inutile puisque les câbles ont finalement rompu les uns à la suite des autres, précipitant le spectaculaire écroulement de toute la structure. *« Nous savions que l'observatoire faisait face à une série de problèmes mais personne ne s'attendait à une fin aussi brutale et rapide*, s'émeut Patrick Michel, astrophysicien à l'observatoire de la Côte d'Azur. *Quantité de recherches devaient y être menées en 2021 et dans les années à venir, et il est très difficile de dire, aujourd'hui, lesquelles seront poursuivies ailleurs ou définitivement abandonnées.* »

L'instrument avait été construit au début des années 1960 sur l'île américaine de Porto Rico, au fond d'une dépression naturelle en plein cœur de la jungle. On y accédait depuis la ville côtière d'Arecibo après une heure de route serpentant sur des collines peu élevées mais très arrondies. *« Le site était époustouflant et assez déroutant pour un Européen*, témoigne Alain Lecacheux ▶

PHOTOS : NSA/JPL - DANIELLE FUTSELAAR - UPR ARECIBO -NASA/JPL CALTECH

qui s'y est rendu à deux reprises. *C'était une sorte d'osmose, un peu étrange mais très réussie, de cultures espagnole et nord-américaine, où une centaine de personnes vivaient en permanence dont une vingtaine de scientifiques et de nombreux étudiants.* »

40 000 panneaux en aluminium

L'observatoire se distinguait par sa monumentale antenne réceptrice de 305 mètres de diamètre composée de quelque 40 000 petits panneaux en aluminium. Elle avait longtemps été la plus grande au monde — dix à 30 fois plus que ses rivales — avant que le radiotélescope chinois FAST ne lui ravisse la première place en 2016 avec ses 500 mètres de large *(lire l'encadré ci-dessous)*. C'est grâce à cette gigantesque antenne en forme de coupole que les ondes radio provenant de l'espace étaient recueillies et focalisées vers une panoplie de capteurs. Ces derniers étaient eux-mêmes disposés sur une imposante plate-forme, suspendue 140 mètres plus haut et pesant près de 900 tonnes.

Financé à l'origine par l'armée américaine, le radiotélescope d'Arecibo devait scruter principalement les plus hautes couches de l'atmosphère terrestre — notamment l'ionosphère située entre 50 et 1000 kilomètres d'altitude — et contribuer à débusquer les satellites et missiles intercontinentaux soviétiques. Son utilisation fut toutefois rapidement étendue à divers signaux astrophysiques, émis aussi bien par les voisines de la Terre que sont Mercure et Vénus que par les plus lointaines galaxies. Couvrant une très large bande de fréquences allant jusqu'à 10 gigahertz (FAST ne dépasse pas 3 gigahertz), l'instrument pouvait effectivement détecter différents types d'atomes et de molécules dans les nuages interstellaires. « *Notamment l'hydrogène neutre qui fournit des informations de première importance sur l'évolution et la structure des galaxies* », précise Steve Torchinsky, chercheur au Laboratoire astroparticule et cosmologie de l'université de Paris rattaché pendant plusieurs années à Arecibo.

Sa surface collectrice de 70 000 m² en faisait aussi un instrument privilégié pour mesurer les phénomènes énergétiques transitoires. Les « pulsars » en particulier, cadavres d'étoiles qui tournent très rapidement sur eux-mêmes et émettent des ondes électromagnétiques périodiques aussi brèves qu'une milliseconde. C'est à Arecibo, en 1974, que le premier pulsar binaire fut ainsi décelé. « *Ce couple d'étoiles a permis de confirmer certaines prédictions de la relativité générale et d'apporter les premières preuves indirectes de l'existence des ondes gravitationnelles, découverte saluée en 1993 par le prix Nobel de physique* », rappelle Steve Torchinsky. C'est également à Arecibo, quelques mois avant cette distinction, que les premières planètes extrasolaires ont été mises en évidence en analysant les anomalies dans le mouvement d'un pulsar à 2300 années-lumière de la Terre.

La plus puissante antenne émettrice au monde

« *Mais ce qui rendait cet observatoire si unique et irremplaçable c'était l'émetteur radar installé sur la plate-forme* », souligne Alain Hérique. À l'instar de FAST, la plupart des radiotélescopes ne font en effet qu'« écouter » le ciel sans produire de signal. Or Arecibo était « actif » et possédait la plus puissante antenne émettrice au monde — d'un demi-million de watts — en dehors des équipements militaires. Les signaux transmis et réfléchis vers notre planète étaient si intenses qu'ils avaient permis de dévoiler, en 2003, des lacs d'hydrocarbures sur Titan, lune de Saturne… à plus d'un milliard de kilomètres de la Terre ! « *Depuis une dizaine d'années, ce radar était abondamment utilisé — notamment par la Nasa — pour étudier les astéroïdes*, signale Patrick Michel. *Il était extrêmement précieux pour déterminer leur forme et calculer très*

INSTRUMENTS

En Chine, la relève se fera attendre

Inauguré en 2016 dans le sud de la Chine, FAST (Five hundred meter Aperture Spherical radio Telescope) *(photo ci-contre)* est le plus grand radiotélescope à antenne unique au monde, de 500 m de large et d'une superficie d'environ 200 000 m² carrés. Dépourvu de radar et moins performant qu'Arecibo pour sonder le milieu interstellaire, il peut néanmoins, grâce à sa monumentale surface collectrice, enregistrer précisément les phénomènes astronomiques transitoires que sont les pulsars ou les sursauts radio rapides. *« Même si l'instrument chinois a déjà détecté une centaine de pulsars, il doit encore être perfectionné et n'atteindra ses pleines capacités que dans plusieurs années »*, indique l'astronome Alain Lecacheux. Il n'est ainsi, pour le moment, pas aussi performant que le radiotélescope de Green Bank (États-Unis), qui ne mesure pourtant que 100 m de large. Le projet international SKA (Square Kilometer Array) prendra lui aussi la relève pour étudier les gaz interstellaires, les pulsars ou les ondes gravitationnelles, mais pas avant une dizaine d'années.

XINHUA/OU DONGQU/AFP

Star de la pop culture

Bien connu des cinéphiles, le radiotélescope d'Arecibo a inspiré les décors de nombreux films et séries télévisées dans les années 1990. Notamment pour les scènes finales de *GoldenEye*, un des films de la saga James Bond interprété par Pierce Brosnan ; *Contact*, inspiré d'un roman de Carl Sagan où l'actrice Jodie Foster tient le rôle principal ; *La Mutante*, avec Michelle Williams et Forest Whitaker ; ou encore *X-Files*, dans l'épisode intitulé « Les petits hommes verts ».

COLLECTION CHRISTOPHEL © EON PRODUCTIONS/UNITED ARTISTS

Dans le film « GoldenEye » (1995), le radiotélescope d'Arecibo est devenu pour James Bond une antenne secrète de communication satellitaire située à Cuba.

précisément leur trajectoire, identifier ceux qui pourraient menacer la Terre en particulier. »

À partir du milieu des années 2000, l'installation a cependant commencé à rencontrer d'importantes difficultés financières.. Difficultés aggravées en 2014 par un séisme de magnitude 6,4 qui a endommagé la structure porteuse et surtout, en 2017, par l'ouragan Maria qui a frappé durement l'île de Porto Rico. En 2018, 14 millions de dollars sont réunis pour réparer les dégâts provoqués par l'ouragan. Mais en août 2020, alors que les réparations sont toujours en cours et que l'île se remet d'une nouvelle vague de séismes, l'un des 18 câbles soutenant la très lourde plate-forme glisse soudainement de son encoche. En tombant, l'amarre en acier éventre la parabole sur une trentaine de mètres tandis que la plate-forme se tord. Les parties sinistrées sont difficiles à atteindre pour des raisons de sécurité. Sans compter que la longueur et l'épaisseur des câbles (de 9 cm de section) compliquent l'analyse de leur intégrité. Une équipe devait ainsi se rendre sur le site le 10 novembre pour effectuer des examens approfondis et stabiliser — au moins temporairement — le radiotélescope.

C'est comme si la tour Eiffel venait de s'effondrer

Las ! un deuxième câble a cédé quatre jours avant l'intervention, se brisant cette fois-ci en deux et lacérant une fois de plus la coupole. Or les deux haubans qui ont rompu étaient reliés à la même tour de 100 mètres de haut (il y en avait trois en tout) soutenant l'édifice. Résultat : ce pylône et les câbles restants subissaient dès lors une très forte tension, rendant l'ensemble de la structure extrêmement fragile et instable. « *Le télescope court actuellement un risque sérieux d'effondrement inattendu et incontrôlé* », déclarait ainsi Ralph Gaume, directeur de la Division des sciences astronomiques de la NSF, le 19 novembre, en se fondant sur les estimations de trois équipes indépendantes d'ingénieurs. Elles ne se sont malheureusement pas trompées… « *Nous sommes tous très attristés par la destruction de cet instrument exceptionnel*, insiste Alain Hérique. *Et il y aura, scientifiquement, un vrai manque* », pour l'étude des astéroïdes et la défense planétaire en particulier. C'est aussi un terrible désastre pour les Portoricains qui étaient très fiers et admiratifs de l'iconique télescope, souligne Alain Lecacheux : « *C'est comme si, pour nous, la tour Eiffel venait de s'effondrer.* » ■

ALAIN HÉRIQUE

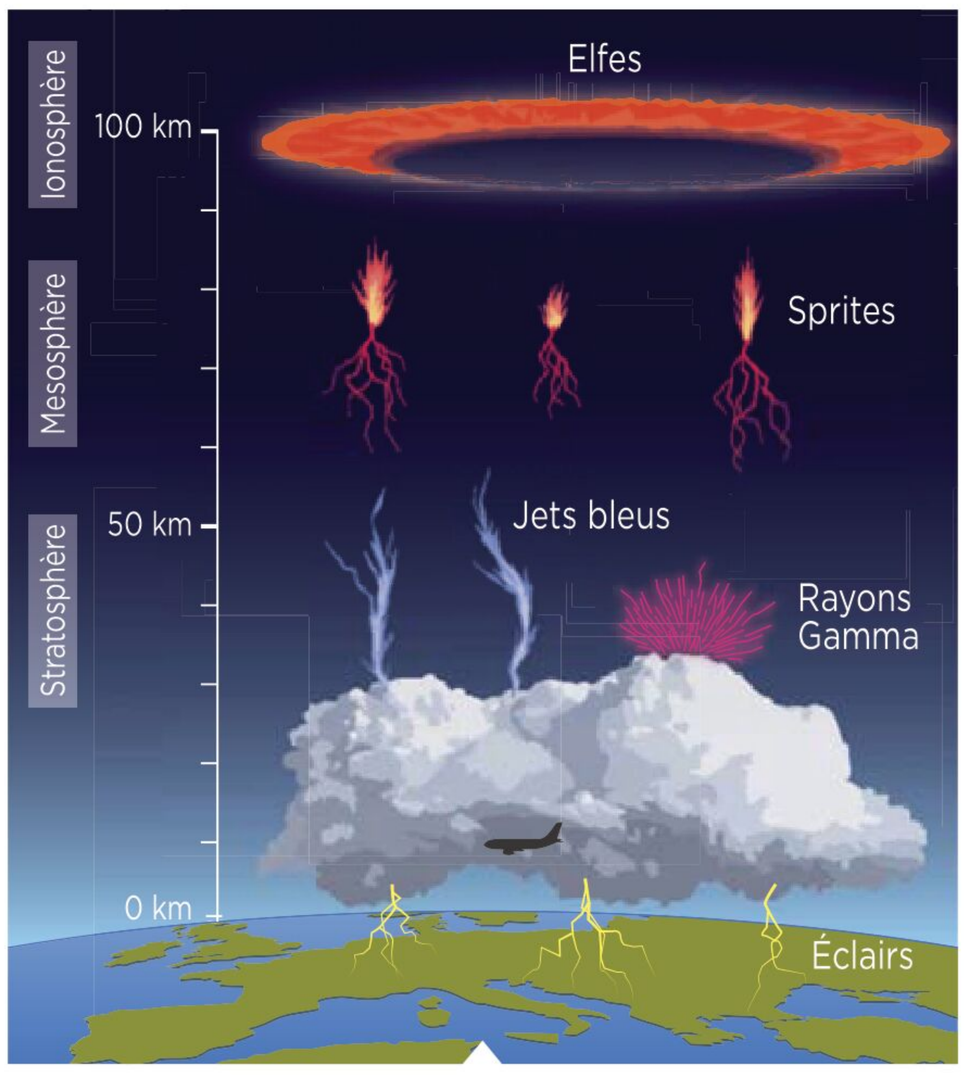
« Nous sommes tous très attristés par sa destruction. Et il y aura, scientifiquement, un vrai manque »

Alain Hérique, chercheur à l'Institut de planétologie et d'astrophysique à Grenoble.

De mystérieux flashs au-dessus des orages

On les appelle sprites, elfes ou jets bleus… Ces étranges phénomènes lumineux qui se produisent dans la haute atmosphère durant les orages intriguent les chercheurs. L'échec de la mise en orbite du satellite Taranis retarde la résolution de l'énigme.

Éclairs ! Tonnerre ! Le spectacle d'un orage éclatant dans la nuit devient plus saisissant encore lorsque l'on découvre qu'il se poursuit… bien au-delà des nuages. « Sprites » (« sylphes » en français), « elfes », « jets bleus » : une kyrielle de phénomènes évanescents illuminent l'espace entre le sommet des cumulonimbus et la haute atmosphère, jusqu'à 100 km d'altitude. Cette face cachée des orages, révélée seulement au tout début des années 1990, était dans l'objectif du satellite Taranis. Las ! celui-ci, qui devait rejoindre son orbite le 17 novembre dernier, a été perdu peu après son lancement en raison d'une défaillance du lanceur européen Vega. Destiné à l'étude de ces phénomènes regroupés sous le terme de TLE (Transient Luminous Events, ou phénomènes lumineux transitoires), le satellite, d'un coût de 110 millions d'euros, gît désormais au fond de la mer. Il devait aussi observer les très énergétiques rayons X et gamma, les TGF (Terrestrial Gamma-ray Flashs ou flashs de rayons gamma terrestres), liés eux aussi aux orages mais distincts des TLE *(lire l'encadré p. 44)*. Le Cnes (Centre national d'études spatiales) étudie désormais la possibilité de construire un Taranis 2 pour mener à bien cette mission d'observation.



BRUNO BOURGEOIS

À la suite d'un certain type d'éclairs, un champ électrique se crée sur des dizaines de kilomètres, produisant des phénomènes distincts selon l'altitude.

Étrange histoire que celle de ces phénomènes qui ne sont photographiés que depuis une trentaine d'années. « *La plupart des TLE ne durent qu'une dizaine de millisecondes voire moins, ce qui les rend normalement invisibles à l'œil nu*, nuance Jean-Louis Pinçon, du Laboratoire de physique et chimie de l'environnement et de l'espace (CNRS-Orléans). *On estime leur fréquence entre 10 000 et 100 000 par jour. Toutefois certains d'entre eux, les sprites par exemple, se produisent souvent par paquets, et on peut alors les apercevoir lorsque les conditions d'observation sont bonnes. D'ailleurs, les pilotes de ligne signalaient depuis longtemps des sortes de lumières rouges au-dessus des orages, sans qu'on aille chercher plus loin…* »

La première observation scientifique a donc lieu par hasard, dans la nuit du 6 au 7 juillet 1989. Une équipe de chercheurs de l'université du Minnesota (États-Unis) teste une caméra haute résolution destinée à l'étude des aurores boréales, lorsqu'elle enregistre le passage d'un orage au loin… En analysant les films, les chercheurs découvrent, sur quelques images, des filaments lumineux très au-dessus des nuages.

Le phénomène est assez précis et étonnant pour donner lieu à une publication dans la revue *Science* en 1990. Les spécialistes

ASTRONOMIE

D'intrigantes lumières ultraviolettes sur Jupiter

Ce sont sans doute les premiers TLE (sprites et elfes) observés hors de la Terre : la sonde américaine Juno a enregistré 11 éclairs ultrarapides… dans l'atmosphère de Jupiter, entre 2016 et 2020, selon une étude parue le 27 octobre dernier dans le *Journal of Geophysical Research* : Planets. Des TLE à la mode jupitérienne : ils brillent essentiellement dans l'ultraviolet et non dans le rouge comme sur Terre car l'hydrogène domine dans l'atmosphère jovienne et non l'azote. Ce résultat doit encore être confirmé par l'observation d'éclairs d'orage associés aux sprites.

YURI BELETSKY

« Sprites » photographiés au-dessus de la cordillère des Andes, au Chili. Ces phénomènes qui se produisent souvent par paquets sont observables depuis le sol quand les conditions sont bonnes. Ici, ils ont dessiné dans le ciel une spectaculaire méduse rouge.

des orages s'emparent immédiatement du sujet *« Nous nous sommes aperçus qu'ils se produisaient partout à la surface du globe, et en abondance, dès qu'il y a des orages »*, conclut Jean-Louis Pinçon.

Si les TLE sont associés aux orages, ils n'ont toutefois rien à voir avec de simples « éclairs inversés ». Les sprites, par exemple, ces longs filaments lumineux, apparaissent entre 40 km et 80 km d'altitude. Autrement dit, ils sont clairement distincts du nuage qui culmine entre 10 et 15 km… Comment se forment-ils ? Les chercheurs ont remarqué qu'ils jaillissent après un type d'éclairs bien particuliers appelés « positifs nuage-sol » : ceux-ci évacuent très rapidement vers le sol les charges positives accumulées au sommet du nuage. Durant un bref instant, il se crée un déficit de charges électriques positives entre le nuage et la haute atmosphère. Ce déséquilibre se traduit par l'apparition d'un champ électrique sur des dizaines de kilomètres.

Se positionner à l'aplomb des nuages pour observer

Vers 70 km d'altitude, le champ produit est suffisant pour entraîner une décharge électrique, à l'origine du phénomène lumineux. Quant à la couleur rouge des sprites, elle est due aux molécules de diazote excitées par la décharge, et qui se désexcitent en émettant des photons dans le rouge, comme dans un tube au néon. *« Nous avons à peu près déterminé les conditions d'apparition de ces sprites*, confirme Jean-Louis Pinçon. *En revanche, la façon dont ils se propagent et dont l'énergie électrique est distribuée et interagit sur les millions de mètres cubes d'atmosphère concernés reste mal connue. »*

Sans compter que les sprites ne sont qu'un type de TLE. Il y a aussi les elfes, d'immenses anneaux rouges en expansion rapide apparaissant à la limite de l'ionosphère, à 100 km d'altitude, ou encore les *blue jets*, des décharges lumineuses bleuâtres ultrabrèves *(voir l'infographie p. 42)*. S'ils ont en commun la présence d'une forte activité électrique dans le nuage d'orage, leur formation et leur propagation diffèrent. Il reste donc bien des aspects à découvrir. D'autant qu'à part deux missions dans l'espace et des observations depuis la Station spatiale internationale, l'étude des TLE a surtout eu lieu depuis le sol, où les couches denses de l'atmosphère compliquent l'exploitation scientifique des mesures. D'où la nécessité de se positionner à l'aplomb des orages, afin de bénéficier de conditions d'observations idéales, l'atmosphère y étant bien moins concentrée.

Depuis son orbite, Taranis devait ▶

HAUTES ÉNERGIES

Comprendre l'apparition de rayons gamma

HUNG-HSI CHANG

Ce « jet géant », classé parmi les phénomènes lumineux transistoires (TLE), a été photographié par un passager d'un vol commercial au-dessus de l'Inde.

Les très énergétiques rayons X et gamma étaient les autres cibles du satellite disparu Taranis. Trouver de tels rayonnements dans les orages a de quoi surprendre, lorsque l'on songe que les émetteurs « traditionnels » sont plutôt les accélérateurs de particules, les explosions thermonucléaires, ou les supernovae. Les TGF (Terrestrial Gamma-ray Flashs) ont d'ailleurs été découverts en 1994 par un satellite de la Nasa qui scrutait les flashs gamma venus de l'espace, et non du sol. Dans un premier temps, ces flashs ont été associés aux sprites. Mais aujourd'hui, on sait qu'ils en sont distincts. « *Sous certaines conditions, les forts champs électriques régnant au cœur des nuages d'orages peuvent se comporter comme de véritables accélérateurs de particules*, explique Jean-Louis Pinçon, du Laboratoire de physique et chimie de l'environnement et de l'espace (CNRS-Orléans). *Les électrons sont accélérés jusqu'à des énergies de l'ordre de 30 mégaélectronvolts, ce qui entraîne l'émission de rayons X et gamma. Le mystère, c'est que dans un accélérateur, les électrons se déplacent dans le vide. Ce qui n'est pas le cas dans les nuages. Comment font-ils pour se propager à cette vitesse ? C'est comme si vous étiez capable de courir aussi vite dans un hall de gare un 15 août que dans une rue déserte…* » Il existe des théories pour tenter d'expliquer cela, mais pour l'heure les physiciens manquent de mesures pour les tester, ce que devait pallier Taranis. Les TGF intéressent aussi le personnel navigant des compagnies aériennes qui est exposé à ces rayonnements, même si les avions cherchent à éviter les orages. « *Des études ont montré que les doses de rayonnements gamma reçues dans les avions sont* a priori *négligeables*, indique Jean-Louis Pinçon. *Mais plusieurs travaux de thèses sont en cours afin d'estimer plus précisément les doses reçues et les risques encourus.* »

- utiliser deux caméras, et quatre photomètres pour enregistrer les émissions lumineuses, les champs électriques et magnétiques étant mesurés dans une large gamme de fréquences grâce à deux antennes et un magnétomètre. Il embarquait également un détecteur de rayons X et gamma et un détecteur d'électrons énergétiques, afin d'enregistrer tous les phénomènes physiques générés par les TLE et TGF. Les capacités de stockage de Taranis permettaient ainsi d'enregistrer entre 10 et 15 événements par demi-orbite. De quoi grossir rapidement les banques de données des chercheurs.

La question d'un Taranis 2 a été immédiatement posée

De telles données sont en effet bien nécessaires, car la compréhension du phénomène dépasse le simple cadre de la physique pour s'étendre à toute l'atmosphère. « *Les TLE ne sont pas pris en compte dans les modèles représentants la physique et la chimie de l'atmosphère, notamment parce qu'ils sont mal compris. Mais vu leur nombre, on ne peut plus les ignorer* », reprend Jean-Louis Pinçon. Par ailleurs, la tranche où ils se produisent, entre 40 km et 100 km, est hors d'atteinte des ballons-sondes, qui s'arrêtent vers 40 km, et des satellites, dont les plus basses orbites se situent vers 160 km. Elle est de ce fait mal connue. Étudier les TLE revient à faire l'inventaire des espèces chimiques qui s'y trouvent, et de leurs interactions.

Après l'échec de son lancement, la question d'un Taranis 2 s'est immédiatement posée. « *Les premiers retours du Cnes sont très positifs, et nous avons commencé à réfléchir aux implications en matière de budget et de ressources humaines* », confie Jean-Louis Pinçon. Les sprites conserveront leurs mystères encore quelque temps… ■

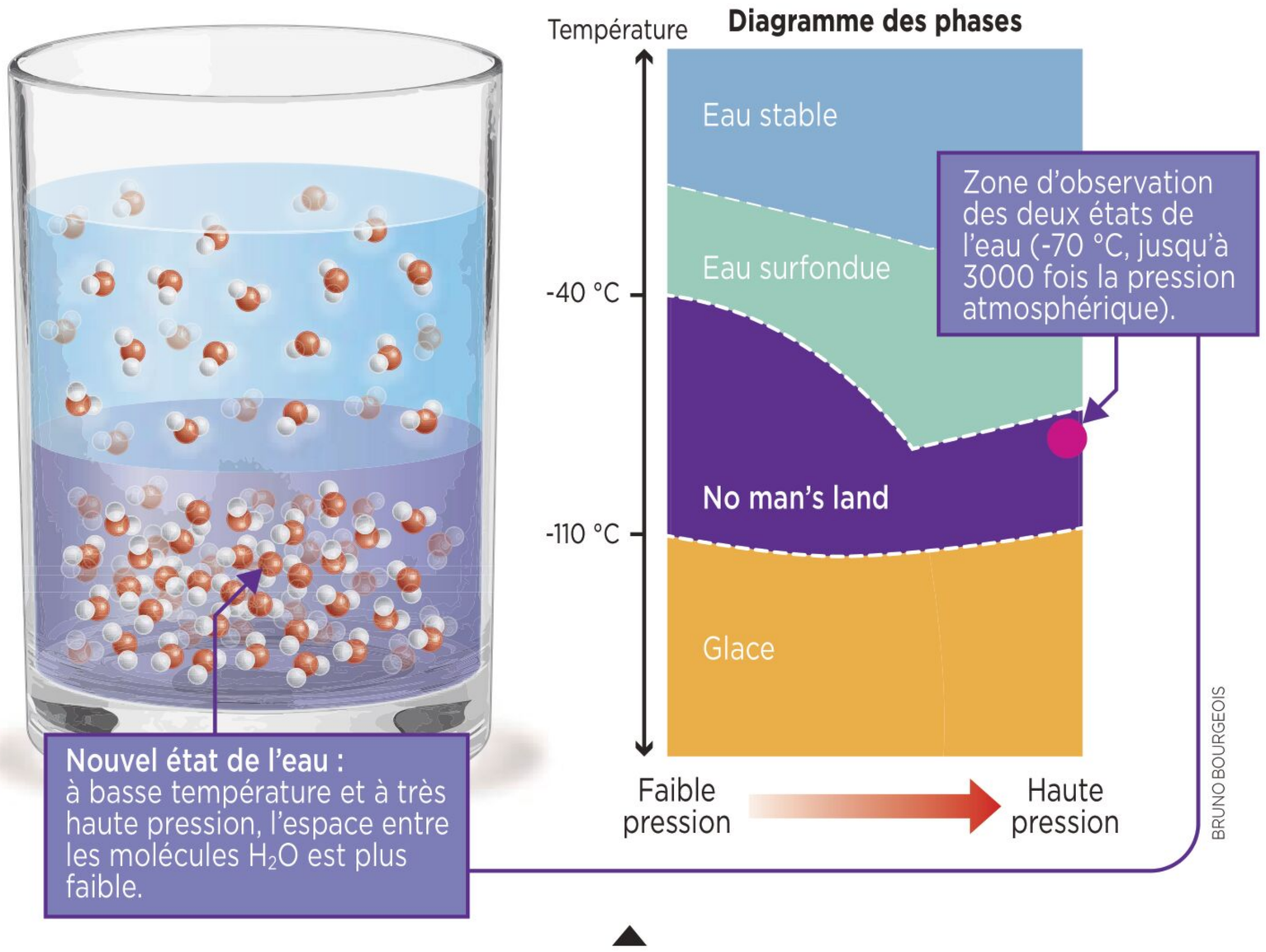
Fabrice Nicot @fnicot07

Les deux états de l'eau liquide

Dans des conditions extrêmes, l'eau liquide à la limite de la glace peut exister sous deux configurations moléculaires.

L'EAU PEUT EXISTER SOUS DEUX PHASES liquides si différentes qu'elles ne se mélangeraient même pas dans un verre ! Voilà ce qu'avance une étude publiée fin novembre dans la revue *Science*. Évidemment, un tel phénomène ne s'observe pas à température et pression ambiante, il faut des conditions extrêmes. Celles-ci correspondent à ce que les chercheurs appellent le *no man's land* du diagramme des phases, ce graphique qui décrit l'état de l'eau en fonction de la température et de la pression *(voir schémas ci-dessous)*. Cette zone se situe entre -110 °C et -40 °C. L'eau est surfondue : sous forme liquide, elle se change en glace très rapidement à la moindre perturbation. Ce qui rend toute observation difficile. Les chercheurs ont exploré une portion de cette zone vers les -70 °C, à des pressions comprises en 2000 et 3000 fois la pression atmosphérique.

Et c'est là qu'ils ont observé que l'eau liquide, composée par définition de molécules en mouvement, peut exister sous deux configurations. « *Il y a un semblant d'organisation dans ces conditions extrêmes*, détaille Anders Nilsson, de l'université de Stockholm (Suède), premier auteur de l'étude. *L'eau, soumise à la plus basse pression, possède une structure similaire à la glace, dite hexagonale, mais très déformée, et qui permet la mobilité des molécules. À plus haute pression, l'organisation perdure à peu près mais l'espace entre les molécules est plus faible.* » La différence de densité entre les phases atteint en effet 20 %, ce qui explique que l'une flotterait au-dessus de l'autre. « *Ces deux phases ont été prédites par des simulations dès les années 1990*, commente Laurent Michot, du laboratoire Physicochimie des électrolytes et nanosystèmes interfaciaux (CNRS/Sorbonne université). *Des tentatives plus ou moins abouties pour les observer ont eu lieu ces trois dernières années, mais aucune ne démontre leur existence de manière aussi irréfutable, et élégante.* »



À -70 °C et sous forte pression, l'eau peut prendre deux formes. Elle conserve à peu près sa structure, mais l'espace entre les molécules se restreint.

Une impulsion laser recrée des conditions extrêmes

Pour parvenir à ce résultat, les chercheurs ont envoyé une impulsion laser infrarouge de 10^{-10} seconde sur des échantillons de glace. Sous l'effet du laser, la glace est brièvement chauffée et comprimée, ce qui permet de créer les conditions extrêmes recherchées. La phase liquide apparaît d'abord à haute pression, puis à plus basse pression lorsque l'effet du laser s'estompe. La structure de l'eau est déduite grâce à la diffraction par rayons X. « *Notre étude est la première à observer le passage de l'eau d'une phase à l'autre* », conclut Anders Nilsson. Cette avancée majeure devrait notamment permettre de faire le tri entre les modèles informatiques qui tentent de décrire le comportement de l'eau, car tous ne prédisent pas ces phases. ■

Fabrice Nicot @fnicot07

L'Europe s'attaque au nettoyage de l'espace

L'Agence spatiale européenne vient de signer un contrat avec la start-up suisse ClearSpace pour la première désorbitation d'un débris spatial.

J. CAILLET/EPFL-ESA

Le petit satellite ClearSpace-1 devra capturer l'étage supérieur de Vespa laissé en orbite par une fusée Vega pour le faire rentrer dans l'atmosphère où ils brûleront.

COUP DE BALAI SPATIAL EN VUE ! L'Agence spatiale européenne (ESA) vient de signer un contrat de 86 millions d'euros avec la start-up suisse ClearSpace pour la première désorbitation d'un débris spatial. Il s'agit en l'occurrence de l'étage supérieur de Vespa laissé en 2013 sur une orbite d'environ 660 à 800 km d'altitude par un lanceur européen Vega.

Vespa a une taille (2 m de diamètre) et une masse (112 kg) semblables à ceux des petits satellites dont le nombre croissant en orbite basse constituera un marché porteur pour les services de nettoyage spatial. C'est dans cette perspective que l'ESA a lancé un appel d'offres à l'industrie européenne en 2018 puis sélectionné ClearSpace. L'entreprise va maintenant travailler avec une vingtaine d'industriels de huit pays européens qui financent le projet : la Suisse pour une large part, mais aussi le Royaume-Uni, l'Allemagne, le Portugal, la Pologne la Suède, la Roumanie et la République tchèque.

Le vaisseau de 500 kg doit être lancé en 2025 par une fusée européenne Vega-C. Il est équipé de caméras, d'un radar et d'un lidar pour la détection du débris cible et de quatre bras articulés pour sa capture. Une fois injecté sur une orbite à 500 km, il devra rattraper sa cible pour une délicate manœuvre de rendez-vous, de capture et de rentrée dans l'atmosphère où les deux engins se consumeront. Au-delà, l'entreprise suisse envisage de mettre au point un engin capable de capturer plusieurs objets en même temps, ce qui permettrait de réduire le coût du service de nettoyage. ■

Sylvie Rouat @srouat1

▸ LA RÈGLE DES VINGT-CINQ ANS

Une règle spatiale impose un délai de vingt-cinq ans pour faire rentrer dans l'atmosphère tout satellite éteint en orbite basse. Déjà quelque 3000 objets ont dépassé cette limite. Postés sur des orbites trop hautes, ils mettront des siècles à redescendre avant de brûler dans l'atmosphère.

▸ DES OBJETS PAR MILLIERS

Depuis Spoutnik (1957), plus de 5500 lancements ont été réalisés, laissant en orbite géostationnaire quelque 5400 objets de plus de 1 m et 34 000 de plus de 10 cm en orbite basse.

▸ LES PROJETS DES AMÉRICAINS ET DES JAPONAIS

Le MEV de l'américain Northrop Grumman est un remorqueur spatial qui s'est amarré au satellite Intelsat 901 le 25 février 2020 pour se substituer à son système de propulsion déficient. Le japonais Astroscale prévoit, lui, de réaliser une mission de démonstration de rendez-vous en orbite prochainement.

INTERVIEW

MURIEL RICHARD

INGÉNIEURE EN CHEF ET COFONDATRICE DE CLEARSPACE

UNE MANŒUVRE DÉLICATE

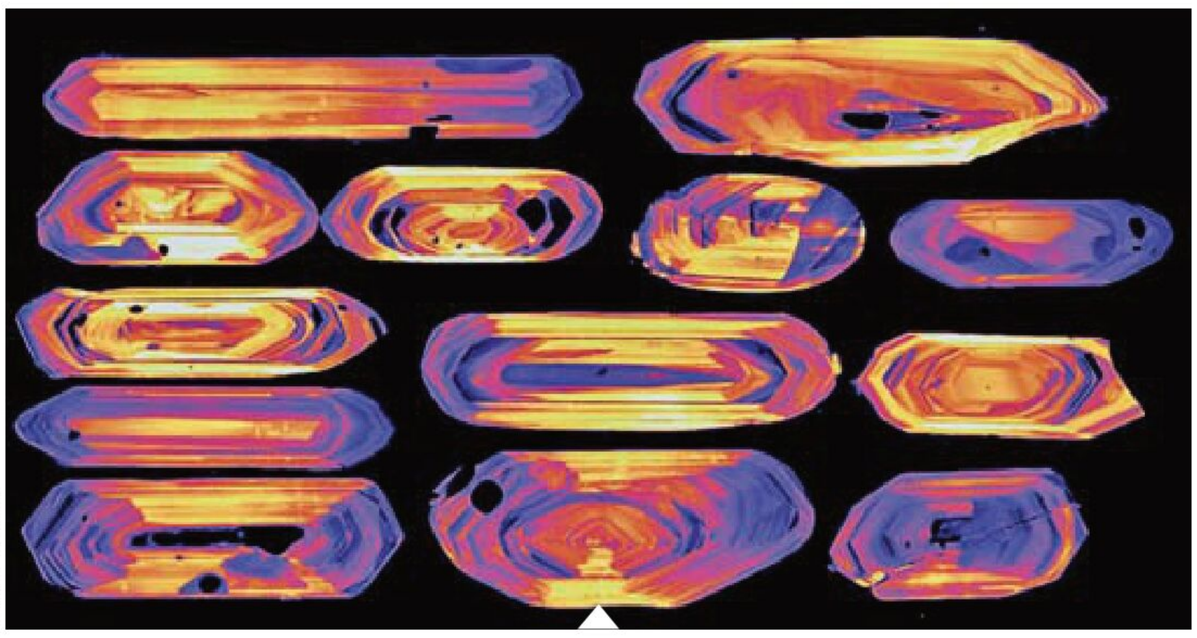
« La manœuvre de désorbitation est délicate, car il faut éviter une collision avec Vespa, qui créerait de nouveaux débris. ClearSpace-1 évoluera d'abord sur une orbite plus basse que celle du débris, ce qui lui permettra de gagner de la vitesse et de le rattraper. Il remontera alors et s'en rapprochera lentement, à 20 mètres. Il caractérisera alors sa rotation à l'aide d'un algorithme entraîné à décrypter des centaines de milliers d'images. Cette intelligence artificielle va ainsi reconstruire le modèle de rotation du débris et permettre au chasseur de se synchroniser avec ce mouvement. Cette navigation autonome en temps réel est le cœur technologique de la mission.

CLEARSPACE

La capture sera alors déclenchée depuis le sol : les bras s'ouvriront pour l'approche finale et se refermeront avant que Vespa ne touche le corps du chasseur. Les moteurs freineront et stabiliseront enfin le couple, avant de réaliser la dernière poussée de rentrée dans l'atmosphère. »

Dans les entrailles d'un volcan endormi

Une nouvelle technique permettrait d'évaluer le volume de magma et ainsi l'ampleur d'une explosion grâce à un minéral, le zircon.



UNIGE/WEBER

Des cristaux de zircon issus du volcan Nevado de Toluca (Mexique) vus en cathodoluminescence. Ce procédé révèle les structures du minéral.

On en compte quelque 1500 : des volcans endormis dont on ne sait quand ils se réveilleront. Encore moins la quantité de magma qu'ils cracheront alors. Et pour cause : il faudrait évaluer une quantité de matière reposant jusqu'à 10 km sous terre. Mais cette prédiction pourrait devenir possible grâce aux récents travaux d'une équipe de volcanologues de l'université de Genève (Unige), en Suisse, associée à des chercheurs de l'université d'Heidelberg, en Allemagne.

Elle a mis au point une technique inédite qui consiste à évaluer le volume de la chambre magmatique (la cavité souterraine qui renferme le magma) grâce à un minéral connu pour son utilisation en joaillerie, le zircon. Présent dans les roches volcaniques, celui-ci contient de l'uranium et du thorium, deux éléments radioactifs dont la cristallisation peut être datée. « *Il ne cristallise que dans une plage de température spécifique* », détaille Luca Caricchi, coauteur de l'étude. La vitesse de refroidissement du magma peut ainsi être calculée. « *Quand le magma refroidit, il refroidit le zircon. Plus on a de magma, plus le zircon met de temps à refroidir* », explique le chercheur.

En déterminant l'évolution de la température du magma sous le volcan, il est aussi possible de connaître l'évolution de son volume. Gregor Weber et Luca Carrichi ont appliqué leur méthode au volcan mexicain de Nevado de Toluca, situé à la périphérie de Mexico. Ils ont pu déterminer l'ampleur maximale d'une future éruption de ce volcan, avec un volume de magma estimé à 350 km³... soit quatre fois le lac Léman ! Si ce « scénario du pire » advenait de privilégier, les dégâts seraint donc catastrophiques. « *Mais il faut garder à l'esprit qu'il s'agit de projections pessimistes.* » ■

Marine Benoit

@marin_eben

AURÉLIEN ALVAREZ

PAR AURÉLIEN ALVAREZ *

Vive les mathématiques !

Trop souvent, on ne retient des mathématiques que leur aspect technique, occultant qu'il s'agit d'abord d'une activité humaine avec ses dimensions sociale et culturelle.

Si l'enseignement des maths, de l'école primaire à l'université, fait la part belle aux résolutions d'équations et autres raisonnements abstraits, une place trop timide revient encore à l'histoire et à l'épistémologie de cette discipline. Au-delà de présenter les mathématiques sous un autre aspect que purement technique, on a là l'occasion de donner les moyens aux élèves et aux étudiants de réfléchir sur ce qu'est la science et comment elle se construit dans le temps et l'espace. Chaque objet mathématique est presque toujours le fruit d'une longue histoire, parfois sur plusieurs siècles, où on est passé d'idées floues à des concepts plus précis avant de mettre le doigt sur une définition formelle rigoureuse. Et même arrivé là, ce n'est que rarement la fin de l'histoire...

> « Une prise de recul historique et épistémologique est souvent un levier fort dans l'enseignement d'une discipline scientifique »

Une prise de recul historique et épistémologique est souvent un levier fort dans l'enseignement des mathématiques.

Ce levier peut changer durablement l'image de la discipline en la présentant pour ce qu'elle est vraiment — une science vivante — et contribue par ailleurs à faire évoluer le statut de l'erreur en montrant comment de grands savants ont pu, eux aussi, suivre des chemins erronés. En 2019, l'Académie des sciences a décerné son prix du livre d'enseignement scientifique à l'ouvrage *Passerelles. Enseigner les mathématiques par leur histoire au cycle 3* (1), résultat d'une collaboration étroite entre historiens des mathématiques et enseignants de cycle 3 (2). On ne peut que se réjouir de telles collaborations qui font du bien, beaucoup de bien, à l'enseignement des sciences en général et des mathématiques en particulier. ■

(1) Marc Moyen et Dominique Tournès (coordination), Irem, Arpeme, 2018.
(2) Le cycle 3 recouvre les classes de primaires CM1 et CM² ainsi que la 6e.

* Professeur à l'ENS de Lyon.

Les vigies de la biodiversité

Plus de 9000 spécialistes dans le monde se mettent chaque année au service de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) afin d'établir la liste rouge des espèces menacées. Son protocole scientifique rigoureux permet d'en sauver beaucoup.

Par Loïc Chauveau @Loïc_Chauveau

Isabelle Thiberville est aux aguets. Tous les printemps depuis 2009, cette professeure de mathématiques aujourd'hui retraitée compte les oiseaux. À l'oreille principalement, aux jumelles en cas de doute. Son terrain de jeu : 2 kilomètres carrés très ordinaires partagés à moitié par des lotissements de la ville de Cestas (Gironde) et des plantations de pins. De début mars à mi-juin, elle se poste à trois reprises toujours aux mêmes endroits, et écoute les chants pendant 5 minutes. Mésanges, sittelles, roitelets, coucous, pigeons, fauvettes, hypolaïs polyglottes... tous sont consignés dans son cahier. Rentrée chez elle, elle insère ses décomptes dans la base de données du Suivi temporel des oiseaux communs (Stoc). Première étape d'un état des lieux général de la faune aviaire en France qui, agrégé à ceux des autres pays du monde, aboutit à l'établissement des « listes rouges » de l'Union internationale de conservation de la nature (UICN), qui devrait tenir son prochain congrès mondial à Marseille à l'automne 2021.

Une liste devenue incontournable, signal d'alerte pour le grand public, les gestionnaires des espaces naturels et les États. Un succès qui rend désormais très difficile, voire impossible, de détruire ou aménager des espaces où vivent des espèces « en danger critique d'extinction ». Elles ont ainsi notamment permis récemment de sauver le grand hapalemur, un lémurien de Madagascar, dont les effectifs sont passés de moins de 400 à plus d'un millier aujourd'hui, ou encore la perruche de l'île Maurice qui a failli disparaître et dont l'espèce est forte aujourd'hui de 750 individus.

120 372
espèces animales et végétales ont été évaluées par l'UICN dans le monde au 1er juin 2020.

32 411
espèces sont classées menacées dont 41 % des amphibiens, 14 % des oiseaux, 26 % des mammifères.

1606
espèces menacées en France métropolitaine et outre-mer. 14 % des mammifères, 24 % des reptiles, 23 % des amphibiens et 32 % des oiseaux nicheurs sont menacés de disparition du territoire.

Suivre des oiseaux communs dans des endroits communs

Que serait l'UICN sans Isabelle Thiberville et ses milliers de collègues ornithologues, herpétologues, ichtyologues, entomologistes, botanistes qui, de par le monde, scrutent, observent, comptent le monde vivant ? En France, ils sont 500 environ pour les seuls oiseaux à observer tous les ans le même rituel qu'Isabelle. Retraités, amateurs passionnés, salariés des parcs naturels ou des réserves protégées, ils ont acquis des compétences assez solides pour que leurs résultats ne soient pas mis en doute. « *À la Ligue de protection des oiseaux (LPO), nous les appelons entre nous des "stocqueurs". Ce sont des bénévoles qui suivent les méthodes scientifiques pour faire des constats objectifs de l'état de la population des différentes espèces* », définit Caroline Moussy, en charge du réseau des observateurs de la LPO. « *Personnellement, j'ai appris sur le terrain, en suivant des ornithologues professionnels et la passion a fait le reste* », explique Isabelle Thiberville dont le « carré » d'action, sans grand intérêt écologique, lui a été imposé par le protocole scientifique. Il faut en effet éviter que seules les zones remarquables soient présentes dans les bases de données, le suivi des oiseaux communs imposant des endroits... communs. « *Les forêts de pins sont bien peu favorables aux oiseaux et j'en entends plus dans la zone pavillonnaire que je fréquente, mais uniquement le dimanche du fait du bruit de l'activité humaine* », poursuit la bénévole.

En treize ans d'observations de son carré, elle a eu la satisfaction de découvrir un seul nouvel habitant. Un petit rapace, l'élanion blanc, venu s'installer dans la région. Inconnu jusqu'alors à Bordeaux, il remonte du sud de la France, poussé par la hausse des températures. Son arrivée, comme toutes les autres observations et tendances, a été enregistrée dans une machine désormais bien rodée. « *Depuis 2013, le programme Stoc est informatisé et nous nourrissons désormais en temps réel les bases de données que nous* ▶

PHOTOS : M.HAMBLIN/ NATUREPL/ EBPHOTO - JOSÉ-LUIS GÓMEZ - DE FRANCISCO / BIOSPHOTO - NATUREPL EBPHOTO

La spatule blanche, espèce considérée comme vulnérable en France, a vu sa population se stabiliser voire légèrement progresser grâce aux mesures de protection des lieux où elle nidifie (zones humides).

Le bouquetin ibérique, après les mesures de protections prises au début des années 1990, a vu ses effectifs croître rapidement, passant d'à peine 8000 à 50 000 en moins de dix ans.

Le « yakusugi » ne vit que sur l'île de Yaku, qui a été classée parc naturel national par le gouvernement japonais. Cette variété de cèdre du Japon (« Cryptomeria japonica ») a une longévité remarquable (de 2000 à 7000 ans).

La France a aussi sa liste rouge

Le degré de menace est déterminé pour chaque espèce recensée selon les critères de l'UICN.

Phoque moine

Saxifrage musquée

Lynx

Spiranthe d'été

Lagopède alpin

Héron crabier

PHOTOS : NATUREPL/EBPHOTO - JMM - NATURAGENCY - BIOSPHOTO

gérons en collaboration avec le Muséum d'histoire naturelle à Paris, explique Gwénaëlle Quaintenne, chargée de mission à la LPO. *Ces données servent aux listes UICN, mais aussi aux rapports à fournir à l'Union européenne pour juger du respect par la France des directives Habitat et oiseaux ainsi qu'aux administratifs et politiques qui statuent sur les dates d'ouverture de la chasse et sur les espèces chassables ou non.* » « *À sa création en 1989, le Stoc ne s'appuyait que sur des données fournies par des observateurs sans encadrement méthodologique*, appuie Florian Kirschner, en charge des « listes rouges » à l'UICN France. *Depuis 2001, l'Union européenne a décidé d'un cadre normalisé pour tous les pays.* » Pour l'UICN, ce cadre scientifique est un renfort de poids afin d'assurer la fiabilité de sa « liste rouge » créée en 1964, et donc sa crédibilité. Le protocole est désormais bien établi. Chaque espèce est évaluée selon l'importance de sa population sur dix ou trente ans — en adéquation avec la durée de vie des animaux concernés — la proportion d'individus en âge de se reproduire et « l'aire de répartition » des espèces, c'est-à-dire les zones qu'elles occupent. Les tendances à la hausse ou à la baisse de ces critères ainsi que le degré de fragmentation des espaces naturels décident du statut final selon une échelle désormais bien connue qui va de « en danger critique d'extinction » à « préoccupation mineure » *(voir ci-dessus)*. « *La richesse de l'UICN, c'est ce réseau de plus de 9000 spécialistes dans le monde qui sont soit des bénévoles très compétents, soit des scientifiques appartenant à des universités, soit des experts embauchés par des ONG spécialisées, soit des naturalistes chevronnés qui connaissent très bien les animaux qu'ils suivent et leurs milieux* », expose Florian Kirschner. Les sources d'évaluation sont ainsi multiples : constats des associations de sauvegarde sur le terrain ou d'observateurs comme Isabelle Thiberville, articles universitaires, travaux des réseaux de spécialistes consa-

CONSERVATION

Des aires protégées en mal de ressources

À côté des listes rouges des espèces en danger, figurent les listes vertes des aires protégées répondant aux critères de l'UICN : une gouvernance faisant participer les populations locales, des limites incluant les zones assurant une bonne protection des espèces, des moyens en personnel et en matériels de surveillance et des résultats probants. Or, si plus de 260 000 aires protégées sont répertoriées sur la planète, très peu remplissent ces critères. « *Moins d'un quart d'entre elles ont des ressources suffisantes pour assurer une protection des espèces et des habitats efficaces* », assure Jean-François Silvain, président de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB). Les limites de ces zones sont le plus souvent dessinées pour éviter de rentrer en conflit avec des intérêts économiques. Ainsi, 4 % des populations d'oiseaux, 8 % des amphibiens et 9 % des mammifères bénéficient réellement d'une protection territoriale. Au deuxième semestre 2021, les États vont se retrouver en Chine pour négocier un agenda 2020-2030 destiné à stopper les destructions de la nature et l'érosion de la biodiversité. Sur la table, la proposition de protéger 30 % des surfaces terrestres est en bonne voie d'être adoptée, alors qu'aujourd'hui 17,5 % sont (mal) préservées. Mais la proposition d'instaurer une protection intégrale sur 10 % des continents et océans a, elle, été retoquée.

crés à une seule famille comme les éléphantidés ou les grands singes. Les membres sont réunis en fédérations placées sous l'autorité d'organismes publics internationaux comme le Bird Life International pour les oiseaux ou les Royal Botanic Gardens, Kew à Londres pour les plantes. Au sommet de cet organigramme, la commission de sauvegarde des espèces (Species Survival Commission SSC) composée de 130 groupes de travail, statue sur le classement à accorder à l'espèce étudiée.

Associations et États sur un pied d'égalité

L'UICN est par ailleurs à l'origine de la Convention de Washington sur le commerce illégal des espèces protégées (Cites) qui criminalise les échanges d'ivoire, d'écailles de pangolins ou de bois de rose. Ce poids international tient à la structure même de l'Union. Parmi ses 1300 membres, se côtoient 160 États, 250 agences gouvernementales — comme l'Office pour la biodiversité, le Conservatoire du littoral ou l'Office national des forêts en France —, plus de 800 ONG et 23 organisations de peuples autochtones. Un cas unique où gouvernements et associations de protection de la nature ont la même voix au chapitre. *« Lors du prochain congrès à Marseille, nous voterons — comme nous le faisons tous les quatre ans — de nouvelles motions qui auront une réelle légitimité,* assure Sébastien Moncorps, directeur du comité français de l'UICN. *Elles montrent un consensus sur la nécessaire protection des milieux naturels et une fois adoptées, elles peuvent être utilisées comme argumentaires sur le terrain par des associations en lutte.* » L'éléphant d'Afrique, le grand panda de Chine ou l'orang-outang de Bornéo ne sont donc pas les principaux bénéficiaires de ces dispositions. En France, la première liste rouge concernant les papillons de jour a été divulguée en 2012. Neuf autres rapports ont été édités depuis, concernant aussi bien les très visibles mammifères que les très discrètes libellules. *« Nous procédons là aussi par la collecte de toutes les informations disponibles tant dans la littérature scientifique que par les réseaux de spécialistes et nous décidons collégialement des statuts à accorder lors d'ateliers d'évaluation sur trois jours* », raconte Florian Kirschner. On sait ainsi qu'en France, près d'une espèce de poissons d'eau douce sur cinq est menacée, qu'une espèce de reptiles et une espèce d'amphibiens sur cinq risquent de disparaître du territoire métropolitain, que sur 127 espèces de mammifères terrestres et marins vivant dans l'Hexagone, 17 sont menacées et 24 quasi menacées comme le vison d'Europe, le putois, le grand hamster, le lynx boréal. *« Les extinctions, ça arrive aussi en France,* prévient Florian Kirschner. *Le pika sarde* [un cousin du lapin] *a disparu de Corse à une date mal établie, la baleine franche de l'Atlantique Nord ne fréquente plus le golfe de Gascogne depuis le XIXe siècle et plus récemment le phoque moine a déserté le littoral provençal depuis les années 1930.* » Il faut se poser cinq minutes au même endroit tous les ans pour rester la vigie d'un monde fragile… et tenter d'en sauver tous ces habitants non humains. ■

PIERRE WITT/HEMIS.FR

La Ligue de protection des oiseaux recense les données d'observation des bénévoles pour alimenter une banque de données cogérée avec le Muséum national d'histoire naturelle de Paris (ici, identification et baguage d'un martin-pêcheur d'Europe à l'étang de Marcenay, Côte-d'Or).

FLORIAN KIRSCHNER

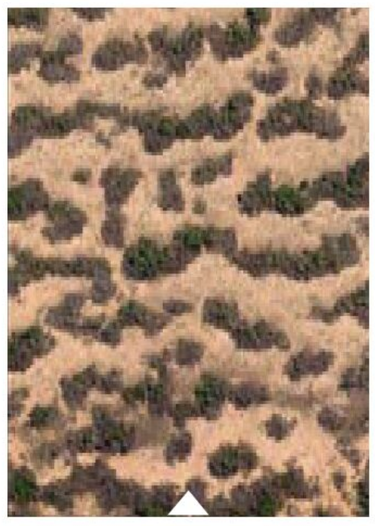
« Nous collectons toutes les informations disponibles et décidons collégialement des statuts à accorder aux espèces »

Florian Kirschner, en charge des « listes rouges » à l'Union internationale pour la conservation de la nature France

Le mystère des cercles de fées aiguise la curiosité

Pour expliquer l'origine de ces étranges formations observées en Australie et en Namibie, un scientifique a analysé la végétation, la composition du sol et la disponibilité en eau. Son modèle est dérivé des travaux du célèbre mathématicien Alan Turing.

SOUFFLE DE DRAGONS, empreintes de pas d'un dieu foulant la terre, portails spatio-temporels vers des mondes inconnus, traces d'atterrissage d'ovnis... Confrontées depuis des siècles à de mystérieux cercles de plusieurs mètres de diamètre dénués de végétation, les populations de certaines zones arides de Namibie et d'Australie ont tenté d'expliquer leur présence, en faisant souvent intervenir le surnaturel. Mais elles ne sont pas les seules à chercher une explication à ces phénomènes étranges. Depuis une vingtaine d'années, des scientifiques de tous horizons se cassent aussi les dents sur ces « cercles de fées ». Les théories s'accumulent, se contredisent parfois, sans parvenir à expliquer l'ensemble des phénomènes... Mais une nouvelle étude, publiée voici quelques mois dans le *Journal of Ecology*, pourrait changer la donne : pour l'équipe de Stephan Getzin, de l'université de Göttingen (Allemagne), ces étranges figures résulteraient de phénomènes écohydrologiques complexes. « *C'est un article très complet qui documente très bien les processus à l'œuvre dans les cercles de fées australiens* », analyse Doyle McKey, professeur au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive de l'université de Montpellier. De quoi lever un pan du voile.



GOOGLE EARTH

La « brousse tigrée » (ici, au Niger) est un autre exemple de paysage à motifs réguliers, présent en Afrique et en Australie.

L'intérêt de l'étude allemande est avant tout de proposer une explication faisant appel à plusieurs facteurs : végétation, composition du sol et disponibilité en eau. Tout le contraire de la plupart des théories émises jusqu'à présent qui incriminaient souvent une cause unique. Ainsi des termites, désignés en 2005 comme les uniques architectes de ces figures géométriques namibiennes par l'entomologiste américain Walter Tschinkel, de l'université d'État de Floride (États-Unis). Le chercheur spécule alors que, sous l'action des galeries creusées par les insectes, la végétation ne peut plus s'alimenter et meurt. Par la suite, d'autres théories viendront concurrencer celle-ci. Au fil des publications, l'agent en cause deviendra le relargage de gaz toxiques ou d'hydrocarbures présents dans le sous-sol, l'action des fourmis, celle des rongeurs, la mauvaise influence d'une plante locale (*Euphorbia gummifera*) sur ses voisines, etc.

Pourquoi autant de théories et si peu de réponses satisfaisantes ? « *C'est le problème de toutes ces études*, analyse Stephan Getzin. *Elles émanent de chercheurs qui créent des liens entre leurs propres travaux et le phénomène. Or, corrélation n'est pas cause. Ce n'est pas parce qu'un expert identifie la présence de son sujet d'étude dans un cercle de fées que celui-ci en est le responsable.* » Le chercheur a ainsi voulu préalablement vérifier l'hypothèse « termites » pour l'exclure définitivement. « *Nous avons creusé plus de 150 trous et n'avons trouvé aucun de ces insectes*, raconte Stephan Getzin. *Nous ne sommes d'ailleurs pas les seuls ! En Namibie, une équipe a fait de même en 2017 et n'en a également débusqué aucun.* » Ce qui ne signifie pas forcément que les termites ne sont pas impliqués, comme

LEE FROST/AGEFOTOSTOCK

JEREMY T. HEIZEL

▲ ►

Dans le désert du Namib, en Namibie, les cercles de fées croissent là où la végétation se réduit à deux espèces de graminées. Une situation retrouvée en Australie.

le reconnaît lui-même le spécialiste, mais, s'ils le sont, ce serait à un degré bien moindre que ce qu'imaginait Walter Tschinkel il y a quinze ans. « *Les termites des sols sableux namibiens se nourrissent de détritus. Ils peuvent donc jouer un rôle en éliminant les plantes mortes par manque d'eau. Toutefois, il faut chercher ailleurs la cause de la mort de ces plantes et donc la formation des cercles de fées* », poursuit Stephan Getzin pour qui l'explication serait avant tout géologique, reposant sur la rareté de l'eau dans le bush australien. Desséché par le soleil, le sol est tellement encroûté que le peu d'eau qui tombe échoue à y pénétrer. Elle s'écoule alors latéralement jusqu'à rencontrer une porosité et hydrater ainsi certaines graminées de proche en proche. Résultat : une humidité plus importante, donnant des plantes plus vivaces à la périphérie des cercles de fées et s'estompant au fur et à mesure que l'on s'en éloigne, pour aboutir à des formations globalement circulaires. Cette théorie, élaborée après observation des sols australiens, vaut-elle pour les sols sableux namibiens où l'écoulement de l'eau est différent ? D'autres facteurs sont-ils alors à l'œuvre ? C'est pour le vérifier que Stephan Getzin est actuellement en pleine investigation dans le pays. Il a ainsi établi au début de 2020 une cartographie par drones des cercles de fées namibiens et poursuivra le travail durant l'année 2021 à la saison des pluies. L'objectif étant de voir comment les cercles namibiens réagissent aux précipitations.

Sols homogènes, stress hydrique et graminées

Si la question de la genèse de ces structures est importante, elle en amène une autre, qui tarabuste également tous ceux s'intéressant au phénomène : pourquoi ces formations sont-elles si rares et uniquement observées en Australie et en Namibie ? Dans un précédent article de 2019, le cher- ▶

MYCOLOGIE

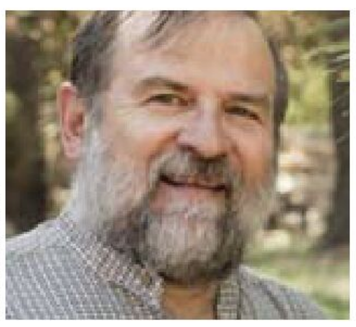
Quand les champignons mènent la danse

JEAN-PHILIPPE DELOBELLE / BIOSPHOTO

Les cercles formés par des champignons dans nos régions sont dus à la croissance circulaire du mycélium souterrain.

Bien différents des formations namibiennes et australiennes, les cercles rencontrés dans nos sous-bois des climats tempérés sont l'œuvre de champignons. Longtemps associés aux sorcières et à leurs sabbats, ils étaient considérés comme des formations diaboliques à l'intérieur desquelles il valait mieux ne pas s'aventurer. Symboles de mort et de pourrissement, utilisés dans les élixirs de la magie noire, les champignons ont en effet souffert en Europe d'une mauvaise réputation jusqu'au milieu du XIXe siècle, époque où les « ronds de sorcières » devinrent des « cercles de fées »...
La raison de ces formations est désormais connue. Les champignons développent des filaments tentaculaires souterrains dans toutes les directions, de manière radiale et à la même vitesse (mycélium). Ce qui conduit à faire sortir de terre des champignons selon une géométrie circulaire.
Ils puisent dans le substrat alentour pour se nourrir, conduisant à une végétation rachitique à l'intérieur des cercles. Alors que les dimensions des cercles de fées africains et australiens semblent constantes d'année en année, le diamètre de ces anneaux augmente, lui, au fil des saisons jusqu'à atteindre des tailles impressionnantes. Dans les prairies américaines, certains cercles vieux de plusieurs siècles, peuvent dépasser les 500 mètres de diamètre.

cheur allemand avait dégagé plusieurs ingrédients indispensables parmi lesquels des sols homogènes et une végétation locale ne comptant pas plus de deux espèces dont l'une est dominante. C'est le cas avec *Triodia basedowii* en Australie et les *Stipagrostis* en Namibie, deux graminées. Il est également nécessaire que le stress climatique soit important : peu de précipitations et fort taux d'évaporation dû au soleil ardent. Cela permettrait aux plantes de pousser — mais pas trop — pour ne pas envahir les zones sans végétation marquant les délimitations des cercles de fées. Mais d'autres structures géométriques intriguent les chercheurs, comme les « brousses tigrées », beaucoup plus répandues, et que l'on retrouve en Afrique, en Australie mais aussi sur le continent américain. Ou encore les *« sols polygonaux que l'on retrouve par exemple en Bretagne ou dans l'Himalaya »*, complète Marc-André Sélosse, biologiste au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Qu'ils forment des cercles, des zébrures ou des taches, tous ces phénomènes partageraient une dynamique s'appuyant sur des modèles d'auto-organisation spatiale des paysages, qui dépendent de plusieurs facteurs, comme le climat local, la disponibilité en eau, la nature des sols et les espèces végétales et animales présentes. C'est la théorie de Stephan Getzin ainsi que de Doyle McKey. Et ce dernier de conclure : *« Il est intéressant de noter que tous ces modèles dérivent des travaux d'Alan Turing, celui-là même dont les travaux ont permis le décryptage du code Enigma des nazis. Il s'intéressait à quantité de choses, y compris la formation de motifs dans le pelage des mammifères. Les mêmes équations qu'il a produites en 1952 pour expliquer les taches du léopard et les rayures du zèbre sont mises à profit aujourd'hui pour expliquer ces curieux paysages ! »* ■ **Hervé Ratel**



DOYLE MCKEY

« Les équations produites pour expliquer les rayures du zèbre servent aujourd'hui à expliquer ces curieux paysages »

Doyle McKey, professeur au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE-UMR 5175), université de Montpellier

Pourquoi le danger des avalanches va croître

Le développement des stations de ski dans un contexte de réchauffement climatique, avec un fort enneigement en haute altitude, accentue les risques.

LAURENT GRANDGUILLOT/REA

3275 coulées de neige ont été recensées depuis 1900 en Haute Maurienne où les pentes encaissées situées entre 1400 m et 1700 m d'altitude connaissent un enneigement annuel important (ici, une avalanche de poudreuse près de Bessans).

De la vache au ski. C'est la brutale mutation qu'ont connue en cent ans les vallées alpines. Les villages sont devenus des stations, les alpages des forêts. Et les risques induits par ces hautes altitudes enneigées ont profondément changé. Une équipe de l'Institut national de la recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) et de l'université de Grenoble-Alpes a exploré les archives pour retracer ces mutations pour les communes savoyardes de Lanslevillard, Bessans et Bonneval-sur-Arc, qui occupent le fond de vallée froid de la Haute Maurienne (Savoie). Les pentes encaissées situées entre 1400 et 1700 m d'altitude y sont très enneigées avec 170 jours de précipitations par an. L'Enquête permanente sur les avalanches (EPA), créée en 1899, n'y dénombre pas moins de 129 couloirs et y a répertorié 3275 écoulements depuis 1900.

Pour leur enquête, les chercheurs ont exhumé les cartes anciennes de l'occupation des sols dressées en 1860, 1925 et 1952, ainsi que les photographies aériennes de l'IGN réalisées depuis. Ils en ont ensuite croisé les données avec les recensements de la population et des activités agricoles. Résultat : une évolution en deux étapes qui aboutit à une urbanisation galopante dans un contexte de changement climatique. L'exode rural caractérise les années 1860 à 1950 faisant baisser la population d'un tiers et les surfaces cultivées de 80 % au profit de prairies. Ensuite, c'est un violent mouvement inverse qui s'amorce. « *La surface des zones urbanisées a triplé et la population a bondi de 50 % entre 1975 et 2017* », explique Taline Zgheib, auteure principale de l'étude. Les forêts, elles, ont colonisé les pentes, ce qui, en théorie, est une bonne nouvelle : elles constituent en effet d'excellentes protections contre les avalanches. « *Mais ces repousses d'arbres ne colonisent pas assez haut en altitude et ne sont ni assez nombreuses ni assez denses pour freiner efficacement l'écoulement de la neige* », tempère Nicolas Eckert, chercheur au CNRS.

De possibles nouveaux couloirs avalancheux

Tout au long des décennies 1970 et 1980, les mesures de prévention se sont donc multipliées, des interdictions de construction à l'installation de paravalanches. Dans le même temps, la dynamique de l'industrie du ski s'est accélérée et continue de le faire… alors que l'environnement, lui, est en train de changer. Le réchauffement climatique en cours modifie en effet les précipitations. « *Nos études menées en collaboration avec le Centre d'étude de la neige (Météo France-CNRS) montrent que la neige devient plus rare en dessous de 1500 m, mais aux altitudes supérieures à 2000 m, si les précipitations ne vont pas diminuer, la neige sera plus humide et plus lourde, modifiant ses trajectoires sur les pentes lors du déclenchement d'une avalanche* », détaille Nicolas Eckert. Les chercheurs préviennent : ces évolutions peuvent se révéler dangereuses partout dans les Alpes avec de possibles nouveaux couloirs avalancheux. ■ **Loïc Chauveau**

@Loïc_Chauveau

Les Echos
PLANETE

La planète Terre s'est formée
il y a 4,54 milliards d'années environ.

Aujourd'hui, nous produisons
43 milliards de tonnes de CO_2 par an
et nous épuisons les ressources
de la planète en à peine 7 mois.

Notre modèle de développement doit se réinventer.

Pourtant, des solutions existent déjà pour
promouvoir une économie plus responsable.

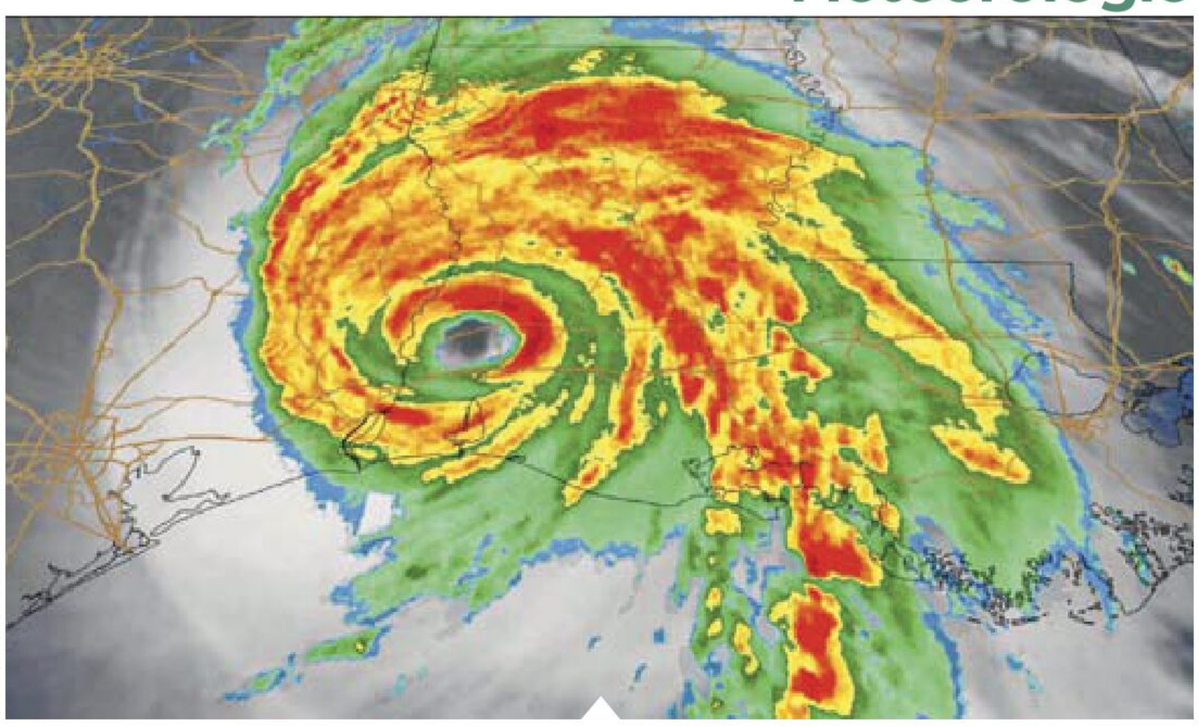
De nombreux esprits engagés se mobilisent
pour inventer un avenir durable
et convaincre de l'urgence à agir :
nouvelles technologies, nouveaux usages, nouvelles idées.

Pour tous ceux qui sont du côté des solutions,
il existe déjà un magazine digital.

Les Echos
PLANETE

Des solutions économiques face au défi environnemental

Retrouvez votre magazine digital
planete.lesechos.fr



THE WEATHER NETWORK - NHC

L'ouragan Laura, au-dessus de la Louisiane, le 20 août 2020. Le réchauffement des eaux de surface des océans renforce les cyclones, qui y puisent leur énergie.

Avec le réchauffement, des ouragans plus puissants

Les événements les plus récents mettent deux fois plus de temps à s'affaiblir et s'enfoncent toujours davantage à l'intérieur du continent américain.

DANS UN FUTUR PROCHE, les ouragans pénétreront encore plus loin dans les terres. C'est la funeste conclusion d'une étude menée par l'université d'Okinawa (Japon). Les chercheurs ont analysé le comportement des ouragans de l'Atlantique Nord ces cinquante dernières années. Ils ont constaté que les plus récents mettaient deux fois plus de temps à s'affaiblir et s'enfonçaient de plus en plus loin dans le continent américain. L'arrivée sur terre coupe pourtant la source d'énergie des vents : « *Les ouragans sont des moteurs thermiques semblables à celui des voitures*, explique le principal auteur de l'étude, Pinaki Chakraborty. *Leur carburant c'est la chaleur pompée à la surface de l'océan, cette humidité chaude se transformant en vents puissants au contact des couches d'air supérieures froides. Quand ils arrivent à terre, ils perdent leur source d'énergie et se dissipent.* »

Pour savoir pourquoi les ouragans s'affaiblissent moins vite, les chercheurs ont modélisé des tempêtes virtuelles et fait varier les paramètres météorologiques et physiques. Ils ont ainsi dégagé une cause principale : l'augmentation de la température de l'eau à la surface des océans due au réchauffement climatique. Plus elle est élevée, plus la tempête est persistante. « *Les ouragans ont ainsi à leur disposition plus d'énergie, ce qui les nourrit plus longtemps, ralentissant leur décrue une fois à terre* », poursuit Pinaki Chakraborty. Ces travaux corroborent les modèles climatiques qui ne prédisent pas une augmentation du nombre de tempêtes mais un renforcement de leur puissance. Les modèles n'avaient cependant pas détecté qu'elles pourraient s'enfoncer plus loin, une donnée qui devra être introduite dans les modélisations. La prochaine étape consistera à vérifier si les autres régions concernées par les tempêtes tropicales comme l'Asie du Sud-Est et le bassin de l'océan Indien subissent elles aussi des dégâts loin des côtes. ■ **Loïc Chauveau**

@Loïc_Chauveau

UNIVERSCIENCE

La Recherche
Climat

PAR CHRISTOPHE CASSOU*
CHRONIQUE COÉCRITE AVEC CÉLINE GUIVARCH **

Sagesse en présence d'incertitude

Ils se nomment scénarios de « faible probabilité-fort impact », et la pandémie de Covid-19 en est un exemple emblématique. La probabilité d'occurrence d'un tel événement est difficilement calculable : on sait qu'elle est petite mais non nulle. En revanche, on connaît son effet dévastateur s'il survient, de par ses conséquences en cascade. Parmi les futurs climatiques possibles, de tels scénarios existent. Ils se caractérisent par de forts niveaux de réchauffement global à la fin de ce siècle, avec des valeurs dépassant +4 à +5 °C par rapport au climat actuel. Les effets de ces réchauffements seraient considérables, et irréversibles pour certains, sur les écosystèmes terrestres et marins, mais aussi sur les sociétés humaines, menaçant la sécurité alimentaire, géopolitique, etc. Ces scénarios correspondent aux cas où les émissions de gaz à effet de serre (GES) seraient extrêmement élevées, mais ils pourraient survenir aussi à des niveaux de concentration de GES plus bas si des processus amplificateurs conduisent à un emballement de la réponse climatique aux activités humaines.

> « La simple existence de scénarios à hauts risques, même si leur probabilité est très faible, donne davantage de valeur à l'action »

Les points de bascule liés aux dynamiques du pergélisol et des calottes polaires ou la perte d'efficacité des puits de carbone naturels sont des exemples de ce que pourraient être ces amplificateurs. De fortes incertitudes subsistent sur leurs mécanismes et leur représentation dans les projections climatiques. Ce type de scénarios d'emballement n'est ni certain ni inéluctable. Or, cette incertitude est souvent brandie comme un frein à l'action alors qu'elle devrait, au contraire, être une raison plus forte d'agir. La simple existence de scénarios à hauts risques, même si leur probabilité est très faible, donne davantage de valeur à l'action. L'anticipation serait peut-être la plus sage des bonnes résolutions de début d'année. ■

* Directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1
** Directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

Les bienfaits de l'assiette anti-inflammation

La santé passe aussi par l'alimentation. Pour éviter d'aggraver l'inflammation naturelle de l'organisme qui peut déboucher sur de nombreuses maladies, un régime composé de fruits et de légumes, de céréales et de légumineuses est à privilégier. Explications.

Par Sylvie Boistard @syboistard

POLLUTION, STRESS, TABAC... Face à ces agressions quotidiennes, l'inflammation chronique de notre organisme nous guette. Surtout, certains aliments consommés au quotidien pourraient constituer un facteur déclenchant. La voie est alors ouverte à de très nombreuses pathologies comme les affections cardiaques, la polyarthrite rhumatoïde, la maladie de Crohn, le diabète ou encore la dépression. Bonne nouvelle, il est cependant possible de prévenir cette inflammation silencieuse, et parfois même de renverser la vapeur, en choisissant beaucoup mieux ce qui compose nos menus. En l'occurrence, réduire sa consommation de sucre, de produits ultratransformés et de mauvaises graisses au profit des fruits et légumes, céréales et d'aliments lactofermentés.

Rappelons que l'inflammation constitue une réponse salutaire du système immunitaire qui permet à l'organisme de faire face aux agressions extérieures (traumatisme, corps étranger, infection, etc.). À condition d'être temporaire. Car les chercheurs ont constaté qu'une inflammation chronique, dite de bas grade, peut jouer un rôle déterminant dans l'apparition de l'athérosclérose, responsable d'infarctus du myocarde et d'accidents vasculaires cérébraux (AVC). « *Le cholestérol de type LDL présent dans la circulation sanguine s'accumule sous forme de plaques d'athérome au niveau des bifurcations des vaisseaux où il s'oxyde, ce qui déclenche une réaction immunitaire par l'activation de macrophages. Or ce phénomène contribue, par un cercle vicieux, à intensifier l'inflammation et à augmenter la taille de la plaque, laquelle peut à tout moment se détacher pour obstruer une coronaire ou se déplacer jusqu'au cerveau* », explique la Pr Karine Clément, directrice de l'unité Inserm-Sorbonne Université, NutriOmique,

RÉMY CORTIN POUR SCIENCES ET AVENIR-LA RECHERCHE

RIC LE ROUX, UNIVERSITE LYON 1

« Une alimentation hypercalorique, riche en sucre et graisses, déséquilibre la composition du microbiote intestinal »

Caroline Michalski, directrice de recherche Inrae au laboratoire CarMeN (Laboratoire de recherche en cardio-vasculaire, métabolisme, diabétologie et nutrition), à Lyon

Huit aliments à privilégier et les quantités recommandées

Fruits et légumes
Au moins 5 portions (80 à 120 g) chaque jour, 3 de légumes et 2 de fruits.

Fruits à coque
Une poignée de 30 g par jour.

Aliments lactofermentés
1 portion par jour au choix.

Légumineuses
(fabacées) Au moins 2 portions de 150 g cuites par semaine.

Céréales complètes
Au moins 1 portion de 150 g cuites par jour.

Huile
2 cuillères à soupe par jour.

Poissons gras
1 fois par semaine au maximum.

Épices
Aussi souvent que possible.

LUCIANO PIROLA

INTERVIEW

LUCIANO PIROLA
CHERCHEUR INSERM
AU LABORATOIRE CARMEN
À LYON

« Prudence avec le régime cétogène »

Qu'est-ce que le régime cétogène, désormais souvent présenté comme bénéfique pour la santé ?
C'est un régime riche en graisses mais pauvre en glucides : il impose un apport journalier de 70 à 90 % de lipides [contre 35 à 40 % selon les recommandations nutritionnelles] et seulement 2 à 3 % de glucides (contre 40 à 55 %). L'apport en protéines restant identique (10 à 20 %). Ce mode alimentaire contraint le foie à transformer les acides gras en corps cétoniques (β-hydroxybutyrate) pour produire un « carburant » alternatif au glucose nécessaire aux cellules.
Ce régime est déjà indiqué aux patients épileptiques résistant aux médicaments, afin de réduire la fréquence des crises.
Il commence également à être suggéré dans d'autres maladies comme le cancer ou le diabète.

Est-il anti-inflammatoire ?
Un effet anti-inflammatoire du β-hydroxybutyrate a été montré par diverses études dont l'une est parue en 2015 *. Mais il faut rester prudent car d'autres recherches — incluant nos récents travaux menés sur des lignées de cellules endothéliales humaines qui tapissent l'intérieur des vaisseaux —, n'ont pas montré de tels effets. Les études doivent donc être approfondies.

Peut-on l'adopter sans suivi médical ?
J'incite à la prudence et il vaut mieux se faire suivre par un médecin ou un nutritionniste car il entraîne des effets secondaires (nausées, fatigue, carence). Je ne pense pas qu'il soit tenable chez tout un chacun sur la durée.

Propos recueillis par S. B.

* The ketone metabolite β-hydroxybutyrate blocks NLRP3 inflammasome-mediated inflammatory disease, Youm YH et al, *Nature Medicine*, 2015.

TAKANORI OGAWA / EYEEM / GETTY IMAGES

Les lipides (graisses) constituent l'essentiel de l'alimentation du régime cétogène, la consommation de glucides (sucres) étant quasi exclue.

à Paris. Ces mêmes mécanismes pourraient d'ailleurs provoquer un diabète de type 2 chez les personnes obèses comme l'a montré Luciano Pirola, chercheur Inserm au Laboratoire de recherche en cardio-vasculaire, métabolisme, diabétologie et nutrition (CarMeN) à Lyon.

Une réaction presque aussi forte qu'après une infection

Mais les personnes en surpoids ne sont pas les seules concernées. Selon des travaux parus dans la revue *Cell*, suivre un régime occidental typique — à base de viande rouge et de produits ultratransformés riches en acides gras saturés et en sucres raffinés — entraînerait une réaction inflammatoire presque aussi forte qu'après une infection bactérienne. « *Une alimentation hypercalorique riche en sucres et en graisses déséquilibre et appauvrit la composition du microbiote intestinal*, explique Marie-Caroline Michalski, directrice de recherche Inrae au laboratoire CarMeN. *Elle modifie aussi la perméabilité de la barrière intestinale, permettant aux bactéries dites Gram négatif d'entrer dans la circulation sanguine. Or les parois de celles-ci contiennent des endotoxines particulièrement pro-inflammatoires (lipopolysaccharides) induisant une inflammation de bas grade ailleurs dans l'organisme.* »
Un lien a aussi été mis en évidence entre l'altération de la barrière intestinale et la perméabilité de la barrière hématoencéphalique qui isole le cerveau du reste de l'organisme. Et les conséquences ont été montrées sur les souris : « *Les lipopolysaccharides activent la microglie, ces cellules neurales chargées d'assurer la défense du système nerveux central contre des agents infectieux*, précise Guillaume Fond, psychiatre et chercheur à l'Assistance publique-Hôpitaux de Marseille. *Ils contribuent ainsi à une neuro-inflammation chronique*

Ce qui protège

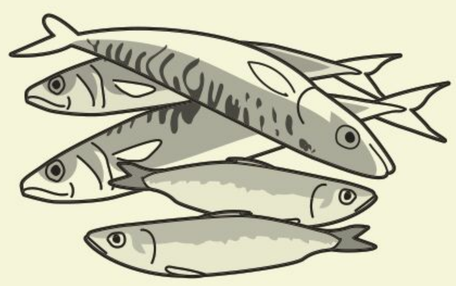
CÉRÉALES COMPLÈTES ET LÉGUMINEUSES. Leurs fibres ralentissent l'absorption des sucres et diminuent les marqueurs de l'inflammation (TNF-α, interleukine-6). À préférer bio.

ÉPICES. La curcumine du curcuma, les proanthocyanidines et le cinnamaldéhyde de la cannelle, la capsaïcine du piment, la pipérine du poivre, les gingérols du gingembre ont de puissants effets anti-inflammatoires et antioxydants.

LÉGUMES, FRUITS FRAIS ET À COQUE. Riches en fibres et en composés antioxydants (polyphénols, vitamine C, sélénium, zinc) qui luttent contre le stress oxydatif, déclencheur de l'inflammation. Fruits secs et graines sont sources d'oméga-3, anti-inflammatoires.

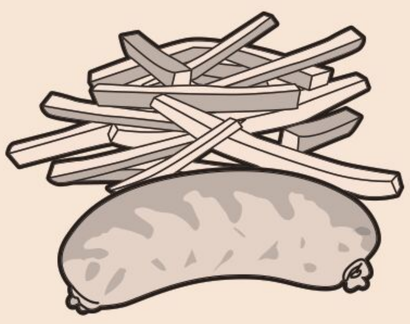
ALIMENTS LACTOFERMENTÉS. Naturellement riches en probiotiques (lactobacilles, bifidobactéries…), yaourts, boissons fermentées (kéfir, lait ribot), fromages artisanaux, choucroute, pain au levain entretiennent l'équilibre du microbiote intestinal, favorisent la sécrétion de cytokines anti-inflammatoires et renforcent la barrière intestinale (jusqu'à 200 g par jour).

HUILES VÉGÉTALES. Privilégier celles de noix, de colza et de cameline pour leurs apports en oméga-3. L'huile d'olive est riche en oléocanthal, un polyphénol aux vertus anti-inflammatoires et antioxydantes. Éviter celles de tournesol et d'arachide, trop riches en oméga-6, pro-inflammatoire.



POISSONS GRAS. Sources d'acide eïcosapentaénoïque (oméga-3). Préférer les petits poissons (maquereaux, sardines) aux gros prédateurs (thon, saumon) contenant plus de polluants (dioxines, PCB, méthylmercure).

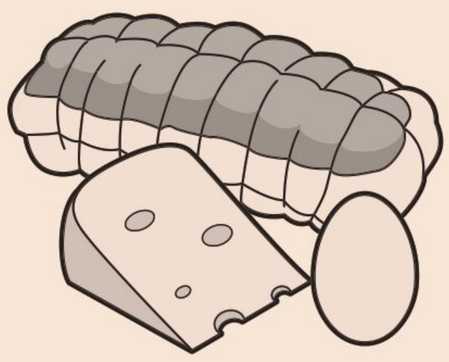
Ce qui amplifie l'inflammation



ALIMENTS FRITS ET GRILLÉS. La cuisson à haute température produit des AGE (produits finaux de la glycation avancée) qui entretiennent l'inflammation, et des amines hétérocycliques aromatiques (AHA), associées à un stress oxydatif.

PRODUITS SUCRÉS ET CÉRÉALES RAFFINÉES. Gâteaux, sodas, pain, pâtes et riz blancs provoquent une hyperglycémie, favorisent le stockage des graisses et provoquent un déséquilibre du microbiote.

PRODUITS INDUSTRIELS ULTRATRANSFORMÉS. Les additifs dont les émulsifiants déséquilibrent le microbiote intestinal. Les acides gras trans (graisses hydrogénées) augmentent le taux de CRP dans le sang, marqueur de l'inflammation.



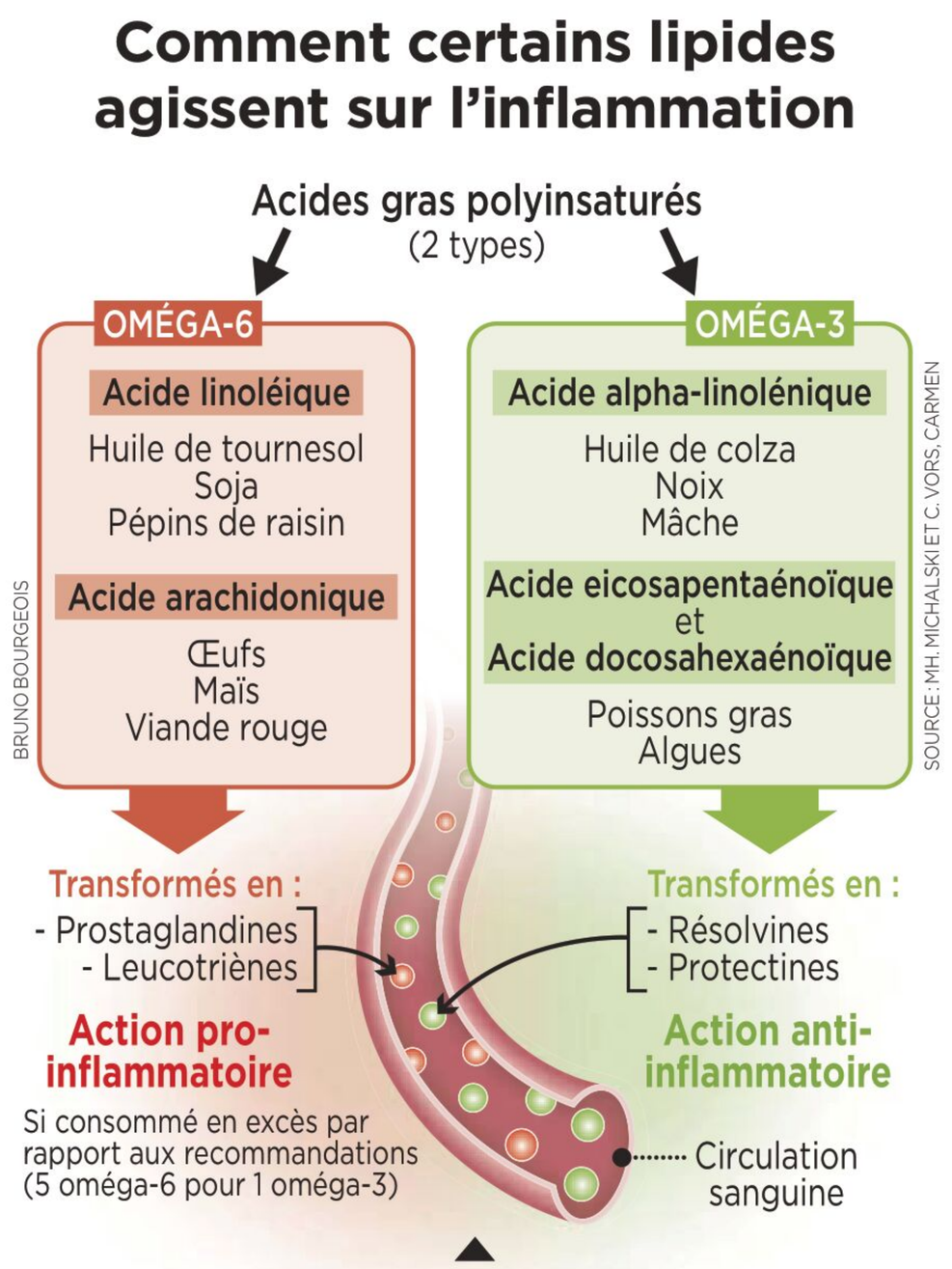
PRODUITS LAITIERS ET VIANDE ROUGE. Sources d'acides gras saturés et d'oméga-6, pro-inflammatoires. Privilégier œufs, produits laitiers, viande bovine et volaille portant le label Bleu-Blanc-Cœur garantissant une alimentation animale enrichie en oméga-3.

ILLUSTRATIONS : BRUNO BOURGEOIS

pouvant être à l'origine de dépressions, de troubles bipolaires ou de schizophrénies. » Les polluants alimentaires sont aussi pointés du doigt. La dioxine, certains métaux lourds (cadmium, manganèse) présents dans le lait, les fromages et les poissons gras, ainsi que les pesticides organochlorés (DDT) sont lipophiles, autrement dit, solubles dans les graisses. « *Ceux qui n'ont pu être éliminés par les mécanismes de détoxication du foie s'accumulent donc dans le tissu adipeux où ils provoquent ou entretiennent un état inflammatoire* », précise Brigitte Le Magueresse-Battistoni, directrice de recherche Inserm au laboratoire CarMeN. En atteste une étude de Xavier Coumoul, professeur de biochimie à l'université de Paris, qui avec une équipe de l'Inserm, l'a montré sur des souris : soumises à un régime riche en graisses (45 % de l'énergie apportée) et exposées à plus de 5 µg/kg de ce polluant organique, elles surexpriment plusieurs marqueurs de l'inflammation conduisant à une fibrose hépatique.

Une diminution de 33 % du risque de dépression

Meilleur atout pour lutter contre ces dérives : le régime dit méditerranéen. Adopter une alimentation composée principalement de fruits et légumes, de céréales complètes et de légumineuses serait associé à une diminution de 33 % du risque de dépression selon une récente méta-analyse basée sur les données de 36 556 adultes, menée par une équipe de l'Inserm et de l'université de Montpellier. Les fibres de ces aliments limitent l'absorption des graisses et agissent sur le microbiote intestinal. Certains végétaux (artichauts, poireaux, pommes...) apportent des fibres dites prébiotiques (pectine, inuline, fructo-oligosaccharides) dont les bactéries se nourrissent. Celles-ci libèrent dans l'intestin des acides gras à chaîne courte (butyrate), capables de moduler la réponse inflammatoire des cellules intestinales en réduisant l'expression de cytokines (TNF-α, IL-12). Sans compter que les polyphénols et les caroténoïdes des fruits et légumes sont de puissants antioxydants, capables de piéger les radicaux libres, les empêchant de détruire les composants lipidiques des membranes cellulaires.



Les oméga-6 augmentent la synthèse de prostaglandines et de lipides pro-inflammatoires dans la circulation sanguine, au contraire des oméga-3, qui produisent des molécules anti-inflammatoires.

Le rôle bénéfique des probiotiques étudié

Le régime méditerranéen fait également une place importante aux acides gras polyinsaturés de type oméga-3, présents dans les poissons gras (sardines, maquereau, saumon), les noix, les graines de lin, la mâche et le cresson. Ces acides gras essentiels contrecarrent la production de cytokines (TNF-α) et d'interleukines (IL-1β, IL-2 et IL-6) pro-inflammatoires. « *L'idéal est de rétablir un bon équilibre entre la proportion d'oméga-6 (présents par exemple dans les huiles de tournesol et de pépins de raisin), et les oméga-3 à 5 pour 1 alors que le rapport actuel varie de 14 à 20 pour 1. Or consommés en proportion excessive, les premiers peuvent avoir un effet délétère en augmentant la synthèse de certaines prostaglandines pro-inflammatoires dans la circulation sanguine* », note Marie-Caroline Michalski *(voir l'infographie ci-contre)*.

Le rôle des probiotiques, des micro-organismes (*Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Saccharomyces*) présents dans les yaourts, les fromages, le pain au levain, certains dérivés du soja (tempeh, miso) ou certaines boissons (kéfir, kombucha), fait aussi l'objet de recherches pour traiter les maladies inflammatoires chroniques de l'intestin (Mici). Ils facilitent la production de mucine, une protéine entrant dans la composition de la barrière intestinale et favorisent la sécrétion de cytokines anti-inflammatoires. Nul doute, aider le corps à lutter contre l'inflammation passe par des choix alimentaires adaptés. ■

PRÉVENTION

Bouger vingt minutes par jour

Vingt minutes quotidiennes d'exercice physique seraient bénéfiques pour lutter contre l'inflammation selon des travaux de l'université américaine de San Diego en Californie (États-Unis) parus dans la revue *Brain, Behavior and Immunity*. L'exercice stimule des récepteurs adrénergiques et régule la sécrétion de cytokines (TNF-α), en lien avec les mécanismes inflammatoires. Certaines de ces dernières, spécifiquement libérées au niveau des muscles (myokines), entrent aussi en jeu, ce qui permet de réduire ce stress oxydatif.

LEGS • ASSURANCE-VIE • DONATIONS

FRANCE
PARKINSON

Plus de 200 000
malades en France

1 personne sur 4
est liée à la maladie

Reconnue d'utilité publique, l'association France Parkinson se mobilise depuis plus de 30 ans, pour améliorer le quotidien des malades, celui de leurs proches et pour faire avancer la recherche.

En transmettant un legs ou en souscrivant à une assurance-vie en faveur de France Parkinson, **vous apporterez l'espoir d'une vie meilleure aux générations futures.**

DEMANDE DE DOCUMENTATION

France Parkinson - 18 rue des Terres au curé - 75013 Paris

FRANCE
PARKINSON
Reconnue d'utilité publique

☐ **OUI, je souhaite recevoir en toute confidentialité des informations gratuites sur les LEGS, ASSURANCES-VIE ET DONATIONS,** sans engagement de ma part.

☐ Mme ☐ M

Nom Prénom .....

Adresse .....

Code postal |_|_|_|_|_| Ville .....

Téléphone |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

Email .....

Les informations vous concernant sont enregistrées dans un fichier informatisé par France Parkinson. Elles sont destinées aux services de l'association à des fins de gestion interne, pour répondre à vos demandes et faire appel à votre générosité. Elles seront conservées pendant la durée strictement nécessaire à la réalisation des finalités précitées.
Conformément à la loi « informatique et libertés », vous pouvez vous opposer à l'utilisation de vos données à caractère personnel ou y accéder pour leur rectification, limitation, effacement ou portabilité en contactant : France Parkinson - Service relation adhérents/donateurs – 18 rue des Terres au Curé – 75013 Paris ou par e-mail : relationdonateur@franceparkinson.fr

Pour plus d'informations, n'hésitez pas à contacter
Damien CONZATTI
au 01 45 20 20 73
ou par e-mail
d.conzatti@franceparkinson.fr

FRANCE PARKINSON
18 rue des Terres au curé
75013 Paris
www.franceparkinson.fr

SA20

Sept idées reçues sur le cancer du sein

Pour aider les femmes à traverser l'épreuve d'un cancer du sein, le Dr Krishna B. Clough, cofondateur de l'Institut du sein à Paris, balaie dans un livre les fausses croyances culpabilisantes. Entretien.

Alors que 58 000 femmes sont diagnostiquées chaque année en France, de nombreuses idées reçues circulent sur le cancer du sein, première cause de mortalité par cancer chez la femme en France. Rencontre avec le Dr Krishna B. Clough, chirurgien, cancérologue, cofondateur de l'Institut du sein à Paris et ancien chef de service de chirurgie de l'Institut Curie, qui démêle le vrai du faux à l'occasion de la parution de son livre *Confidences et vérités sur le cancer du sein* (Larousse) dans lequel il fait un point sur l'état de la science.

1 Il doit être traité en urgence

« Dans la majorité des cas, non. La plupart des cancers du sein ne sont pas à traiter en urgence. Cela ne concerne qu'environ 15 % d'entre eux, ceux dits prolifférants : tumeurs chez la femme jeune, survenant pendant la grossesse, ou à biologie prolifférante. Celles-ci sont diagnostiquées dès la biopsie. L'idée répandue qu'il y a urgence dans tous les cas s'explique par la peur que le diagnostic suscite. Ce qui aboutit à des prises en charge dans la panique, par des médecins non spécialisés. Les faits montrent pourtant qu'une tumeur met plusieurs mois à grossir de quelques millimètres seulement. Lorsqu'on la dépiste, elle est déjà présente depuis des années et attendre quelques semaines de plus ne changera rien au traitement. Une fois la mammographie réalisée et le résultat de la biopsie connu, la patiente a le temps de prendre rendez-vous avec l'équipe qui assurera la meilleure prise en charge. Il est en effet démontré que le suivi d'un cancer du sein par des équipes ultraspécialisées augmente les taux de guérison et de conservation du sein, réduisant aussi les séquelles des traitements. Pour trouver une bonne équipe, il ne faut pas hésiter à multiplier les avis : le médecin généraliste ou le gynécologue sont souvent de très bon conseil. S'ils vous donnent les mêmes informations (médecin, établissement...), c'est de bon augure.

2 Les habitudes de vie peuvent expliquer sa survenue

Dans une certaine mesure seulement. Dans l'état actuel des connaissances, nous savons que la génétique explique 7 % des cancers du sein. Pour le reste, plusieurs facteurs de risque ont été identifiés selon le rapport du Centre international de recherche sur le cancer (Circ) publié en 2018 : sur les 58 000 nouveaux cancers du sein par an en France, 15 % sont attribuables à l'alcool, 10 % à l'obésité (en particulier après la ménopause), 4 % sont liés au tabac et 4 % à la sédentarité. Parfois pointé du doigt, le travail de nuit intervient dans moins de 1 % des cas, tout comme les radiations ionisantes des mammographies. Conclusion : plus d'un tiers des cancers du sein sont évitables en contrôlant ces facteurs de risques. Il faut surveiller son poids, notamment après 50 ans, avoir une activité physique, éviter de boire et de fumer.
En revanche, contrairement aux idées reçues, aucun lien n'a été établi entre le cancer du sein et la pollution. De même que la littérature scientifique n'apporte pas la preuve d'une causalité entre un grand stress, suite par exemple à un divorce ou à des difficultés professionnelles, et la survenue du cancer.

INSTITUT DU SEIN PARIS

« La consommation d'alcool et l'obésité sont les premiers facteurs de risque de développer un cancer du sein »
Dr Krishna B. Clough

La mammographie permet de repérer une éventuelle tumeur, qu'une biopsie confirmera ou pas.

GARO/PHANIE

DÉPISTAGE

L'IA remplacera-t-elle le médecin ?

L'intelligence artificielle (IA) améliore déjà la prise en charge des cancers du sein. En combinant les données biologiques et d'imagerie de dizaines de milliers de tumeurs, les algorithmes permettent d'optimiser la détection, voire de l'anticiper, et d'évaluer la malignité du cancer. En 2020, la FDA a ainsi accordé une autorisation à deux programmes. L'un pour le diagnostic afin de réduire le recours à la chirurgie, l'autre, pour affiner le dépistage. Google Health développe son propre algorithme, tandis qu'en France le programme Profound IA est utilisé au centre d'imagerie médicale CSE à Paris depuis 2018 pour aider au dépistage. Mais l'IA est toujours au service du médecin pour l'aider dans ses décisions. H. J.

3 Le traitement hormonal de la ménopause en est responsable

C'est faux, même si le traitement hormonal de la ménopause (THM) augmente très légèrement le risque de cancer du sein quand il est prescrit au long cours. L'affirmation que ces traitements en sont responsables repose sur les résultats de deux études anglo-saxonnes très médiatisées [publiées respectivement dans le Jama en 2002 et dans *The Lancet* en 2003], mais qui ont depuis été très critiquées en raison de nombreux biais (types d'hormones administrées, absence de comparaison avec un placebo, etc.). L'étude française E3N *(International Journal of Cancer, 2005)* a conclu au contraire que les femmes sous traitement hormonal de la ménopause ne présentaient qu'une augmentation modérée du risque, et que celle-ci dépendait du type de THM. Le traitement le plus couramment prescrit en France est une association d'œstrogènes cutanés et de progestérone naturelle micronisée. En 2019, une méta-analyse publiée dans *The Lancet* a passé au crible 58 études et a également conclu que le risque dépend du type de traitement et qu'il augmente avec sa durée. Aussi est-ce au gynécologue de décider avec chaque patiente, au cas par cas, si elle doit bénéficier du THM, en fonction des troubles induits par la ménopause et de ses facteurs de risque.

4 L'alimentation est un facteur de risque

Aucun aliment, lorsqu'il est introduit ou retiré seul dans un régime alimentaire, n'augmente le risque de cancer du sein. Ce n'est donc pas en se privant d'aliments (comme le sucre) que l'on diminuera le risque de cancer. En revanche, l'alcool et le tabac *(lire plus haut)* sont clairement identifiés comme des facteurs de risque de cancer du sein, tout comme l'obésité. Le Circ a cependant mis en évidence qu'une alimentation pauvre en fibres pourrait augmenter le risque de 3 à 4 %. Quant à au régime cétogène, qui exclut le sucre, il ne permet pas de diminuer le risque *(lire aussi p. 60)*.

LOUISE OLIGNY / BSIP

La chirurgie est la pierre angulaire de l'édifice de la guérison du cancer du sein, car elle est beaucoup moins mutilante qu'avant.

5 La chimiothérapie est le traitement de référence

Non, c'est la chirurgie qui constitue la pierre angulaire de l'édifice de la guérison du cancer du sein. Comme pour toutes les tumeurs solides, qu'on oppose aux tumeurs liquides (leucémies). Le bénéfice de la chirurgie est alors de 10 à 50 fois plus important que celui des médicaments. Le Pr Pierre Pouillart, ancien chef de service du département de chimiothérapie de l'Institut Curie, disait : " *Si vous prenez 100 femmes guéries du cancer du sein, 80 l'ont été par la chirurgie seule, 15 par l'adjonction des traitements médicaux et 5 par l'adjonction de la radiothérapie.* "
La chirurgie est infiniment moins mutilante qu'avant : 75 % des femmes conservent leur sein. Et pour celles qui doivent subir une mastectomie [ablation du sein], une reconstruction est toujours réalisable. Les progrès sont tels aujourd'hui que la chirurgie se fait en ambulatoire, ou lors d'une hospitalisation de 24 heures.

6 Les médecines alternatives peuvent le guérir

Nous proposons aux patientes qui le souhaitent des soins de soutien — en plus de celui psychologique systématique — pour accompagner les traitements. Les patientes doivent cependant faire attention à ne pas adhérer à des logiques opposées aux traitements traditionnels dont l'efficacité est formellement démontrée. Certaines femmes tombent sous l'emprise de pseudo-spécialistes et abandonnent les traitements conventionnels pour des traitements alternatifs. Une étude a démontré que le recours à ces seuls derniers conduit irrémédiablement à une diminution importante de l'espérance de vie.

7 La lutte contre le cancer est une guerre

Non, il ne s'agit pas d'une "guerre", ni d'un "combat", même si ces termes sont de plus en plus utilisés y compris par les médecins. Je suis très opposé à cette sémantique, lorsque je m'adresse aux patientes car je ne pense pas qu'elles aient toutes envie de se battre et d'en découdre comme sur un champ de bataille. Notre démarche est à l'opposé de cela : nous nous efforçons d'accompagner les patientes, d'apaiser leur peur, en utilisant les termes les moins violents possibles.
Je crois fondamentalement en une médecine humaniste, qui repose, certes, sur la technicité mais aussi sur la disponibilité, la proximité, la protection, le partage du savoir, sans rapport de sachant à non-sachant. Le risque que nous courons en proposant une médecine de plus en plus technique et sophistiquée serait d'oublier l'essence même de notre métier, c'est-à-dire s'occuper de la personne. J'espère que cette médecine, que l'on m'a enseignée et que j'enseigne, sera toujours celle des générations futures. » ■

Propos recueillis par
Elena Sender
@Elenasender

Vivre à la campagne réduit le risque d'asthme

Les enfants exposés dès la naissance aux animaux ou aux productions agricoles sont les mieux dotés en espèces bactériennes.

Une exposition précoce aux microbes de l'environnement réduit le risque d'asthme chez l'enfant en favorisant le bon développement de son microbiote intestinal, conclut une vaste étude européenne dans la revue *Nature Medicine*. Une équipe internationale de chercheurs a comparé les populations bactériennes présentes dans les selles d'enfants âgés d'un an — quand le microbiote du côlon s'est déjà largement formé pour le reste de la vie. Ils ont constaté que les enfants exposés dès la naissance aux animaux de la ferme ou aux productions agricoles sont les mieux dotés en espèces bactériennes. Ce microbiote plus riche permet de mieux digérer les fibres alimentaires, les glucides présents dans le lait maternel et les végétaux qui sont dégradés uniquement par des enzymes bactériennes. Or la dégradation bactérienne des fibres produit des acides gras à courte chaîne (AGCC) tels que le butyrate qui ont des effets bénéfiques sur le système immunitaire. Ainsi, les enfants au microbiote le plus diversifié à un an et qui produisaient le plus de butyrate ont deux fois moins de risque que ceux au microbiote le plus appauvri d'avoir de l'asthme par la suite.

NICOLE MATTHEWS/ PLAINPICTURE

La stimulation précoce du système immunitaire par des agents microbiens le renforce.

Un microbiote intestinal bien diversifié

« *Cette étude est intéressante*, note Gilles Mithieux, spécialiste à l'Inserm des acides gras à courtes chaînes, *et confirme l'importance pour la santé de la consommation de fibres alimentaires dès le plus jeune âge.* » L'hypothèse dite hygiéniste émise dès la fin des années 1980, selon laquelle le bon fonctionnement du système immunitaire dépend de sa stimulation précoce par de nombreux agents microbiens, sort ainsi renforcée avec l'intervention d'un nouvel acteur de poids dans ce processus, le microbiote intestinal. La production d'AGCC chez le jeune enfant serait donc le signe d'un microbiote bien diversifié, gage de protection contre l'asthme et plus généralement d'un bon développement du système immunitaire. ■

Pierre Kaldy

COMMUNIQUÉ

VIRVOLT

L'ÉLECTRIFICATION DE VÉLO CHANGE D'ÉCHELLE

Virvolt, une startup française qui propose de transformer votre vélo classique en vélo électrique, vient de s'associer à **Uber Eats**, application de livraison de repas.

L'objectif est de proposer aux livreurs indépendants qui utilisent l'application, une offre spéciale d'électrification de leurs vélos.

Pourquoi racheter un vélo électrique neuf alors qu'il suffit d'adapter l'ancien pour obtenir de meilleures performances à moindre coût ? C'est la question que s'est posée Jérôme Gaymard, fondateur de **Virvolt** en 2018. Si l'entreprise a pu devenir rapidement leader dans le domaine de l'électrification de vélos en France, c'est avant tout grâce aux livreurs.

Un moteur puissant et léger

ÉCOLOGIQUE EFFICACE PERFORMANT

En effet, en parcourant plusieurs centaines de kilomètres par jour à vélo, ils sont devenus les premiers testeurs du matériel **Virvolt**.

Plus écologique, plus économique, plus efficace et moins fatigant, le kit de conversion électrique séduit massivement les professionnels du cycle. **Uber Eats**, ayant pour but d'améliorer le quotidien des livreurs utilisant l'application, a choisi **Virvolt** pour l'accompagner. La jeune pousse française est désormais en mesure de leur proposer un dispositif spécialement adapté à leur besoin : un moteur puissant (70Nm) et léger (3 kg) ainsi qu'une très grande autonomie (jusqu'à 130 km). Le partenariat avec **Uber Eats** comprend une réduction sur les kits d'électrification pour chaque livreur qui le souhaite ainsi qu'un service de maintenance entièrement dédié au cas où ils auraient besoin d'aide pour s'adapter à leur nouveau bolide électrique.

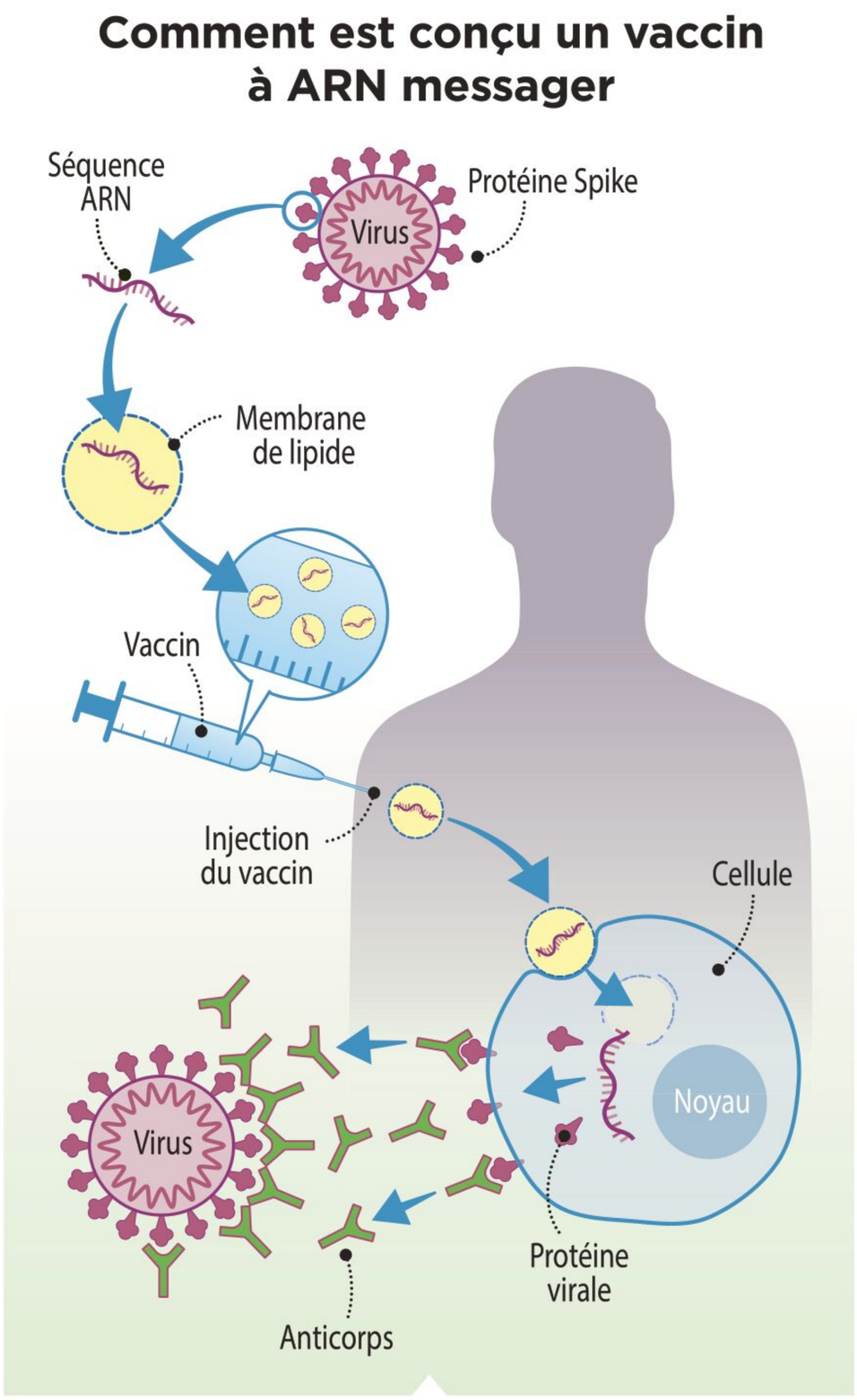
Pour plus d'informations, contactez :
Vaea PERDRIEL
Directrice des relations presses
06 78 43 47 94
vaea@virvolt.fr

Covid-19 : quatre techniques vaccinales pour 2021

La pandémie due au Sras-CoV-2 a mobilisé les laboratoires du monde entier pour développer des vaccins en un temps record. Voici les quatre principales voies de recherche suivies et les perspectives de mise sur le marché.

SI 2020 FUT L'ANNÉE du Covid-19, 2021 sera celle des vaccins pour tenter de le contrer. Jusqu'ici, deux d'entre eux surtout ont focalisé l'attention (Moderna et Pfizer/BioNtech). Mais une dizaine d'autres, en dernière phase d'essai clinique (Oxford/AstraZeneca, Pasteur, Janssen...), pourraient être approuvés au cours de l'année à venir. Tous ont le même objectif : présenter au système immunitaire un antigène contre lequel il doit apprendre à se défendre. Généralement, il s'agit de la protéine Spike (S) du coronavirus, celle qui lui donne sa forme de couronne d'épines et lui sert à infecter les cellules. Mais pas moins de quatre stratégies vaccinales différentes sont utilisées : vaccins à ARNm, vecteur viral, coronavirus inactivé ou atténué et les protéines *(lire ci-dessous)*. Pour aboutir, toutes doivent franchir trois obstacles : en essai de phase 1, prouver leur non-toxicité et trouver le bon dosage ; en phase 2, montrer leur capacité à induire une réponse immunitaire protectrice suffisante (immunogénicité) ; en phase 3, démontrer leur efficacité sur des groupes de plus de 10 000 personnes.

Depuis avril 2019, environ 300 000 volontaires ont ainsi intégré des essais dans le monde, sans effet secondaire grave confirmé. Néanmoins, tout au long des campagnes de vaccination, de nouveaux essais cliniques seront lancés sur différents vaccins, au fur et à mesure qu'ils obtiendront leur autorisation. Un effort de pharmacovigilance sera fait en France avec la plate-forme Covireivac, coordonnée par l'Inserm, sur laquelle se sont inscrites plus de 40 000 personnes pour participer aux essais cliniques nationaux qui compléteront les données fournies par les laboratoires pharmaceutiques. Déjà trois essais doivent débuter d'ici à début janvier avec les vaccins ARNm de Moderna, et à vecteur viral de Oxford/AstraZeneca et Janssen.



Les brins d'ARNm, encapsulés dans des lipides, pénètrent dans les cellules près de l'endroit où le vaccin est injecté. Les cellules fabriquent la protéine virale déclenchant la production d'anticorps.

1 Les vaccins à ARN messager

Pour la première fois dans l'histoire de la vaccination, l'antigène inoculé n'est pas une protéine virale ou un virus atténué, mais des brins d'acide ribonucléique « messagers » (ARNm) qui codent génétiquement cette protéine. Les brins ARNm sont encapsulés dans des nanoparticules de lipide (graisse) qui facilitent leur entrée dans les cellules situées à proximité de l'endroit où le vaccin est injecté. Objectif : « forcer » la machinerie cellulaire à fabriquer la protéine virale contre laquelle l'organisme devra apprendre à se défendre. Une quasi-thérapie génique, à ceci près que l'ARN messager vaccinal n'interagit pas avec le génome dans le noyau des cellules et se dégrade rapidement.

L'avantage de ces vaccins est qu'ils sont beaucoup plus rapides à développer et à produire que les vaccins « classiques » qui néces-

VICTORIA JONES/AP/SIPA

La vaccination des personnes âgées a débuté le 8 décembre au Royaume-Uni, avec le vaccin Pfizer/BioNTech (ici, au Guy's Hospital de Londres).

sitent un temps de culture cellulaire pour la plupart. En revanche, leur conservation et acheminement sur les sites de vaccination sont délicats en raison de l'instabilité des ARNm qui doivent être gardés à des températures de -20 °C à -80 °C. Surtout, « *c'est une technologie nouvelle sur laquelle on a moins de recul que sur d'autres puisque aucun vaccin de ce type n'a encore été commercialisé. Il faut donc rester prudent* », précise la Dr Marie Lachâtre, vaccinologue au Centre d'investigation clinique de l'hôpital Cochin à Paris et l'une des coordinatrices de Covireivac.

À l'heure où nous écrivons ces lignes, seul le vaccin ARNm de Pfizer/BioNtech a été validé par le Royaume-Uni et les États-Unis sur la base des dossiers complets fournis par les industriels aux seules agences sanitaires. Le rapport détaillé de l'Agence américaine du médicament (FDA) concernant ce vaccin a confirmé une efficacité de 95 % en moyenne (plus de 90 % chez les personnes âgées ou avec comorbidités). Et sur les 43 252 participants à l'essai, aucun effet indésirable grave n'a été relevé. Le Royaume-Uni le déconseille aux grands allergiques, comme c'est le cas pour de nombreux autres vaccins. Les effets secondaires les plus fréquents étaient les réactions autour du point d'injection (84,1 %), la fatigue (62,9 %), les maux de tête (55,1 %), les courbatures (38,3 %) et la fièvre (14,2 %). « *Il y a déjà beaucoup de bonnes surprises jusqu'ici* », relève la Pr Élisabeth Bouvet, présidente de la Commission tech-

nique des vaccinations à la Haute Autorité de santé (HAS). Notamment qu'aucune forme grave de Covid-19 n'aurait été enregistrée dans le groupe vacciné avec le vaccin ARN de Moderna. *« Or ce dont on a besoin en urgence, c'est une protection contre les formes sévères de la maladie pour soulager le système de santé »*, précise Élisabeth Bouvet. En France, la plate-forme Covireivac a programmé un essai clinique sur le vaccin Moderna qui devrait débuter entre fin décembre et début janvier.

Les quatre techniques choisies par les laboratoires

VACCINS À ARN MESSAGER

- Moderna Therapeutics (États-Unis),
- Pfizer/BioNtech (États-Unis/Allemagne)
- CureVac (Allemagne)*

VACCINS À VECTEUR VIRAL

- Oxford/Astra Zeneca (Royaume-Uni)
- Institut Pasteur/Merck (France/Allemagne)*
- CanSino (Chine), Spoutnik V (Russie), Janssen (Belgique)

DU CORONAVIRUS ATTÉNUÉ OU INACTIVÉ

- Sinopharm (Chine)
- Sinovac (Chine)
- Codagenix (États-Unis)*

PROTÉINES RECOMBINANTES

- Nanovax (États-Unis)
- Medicago (Canada)
- Sanofi pasteur/GSK (France/Royaume-Uni)*

* Le développement de ces vaccins n'a pas encore atteint la phase 3

2 Vaccins à vecteur viral

Plus classique, cette stratégie consiste à placer la protéine Spike du coronavirus sur un autre virus, un vecteur, modifié pour être non pathogène. *« Cette méthode a une très bonne capacité à provoquer une réponse immunitaire adéquate, car le vecteur viral va mimer une infection naturelle. Il ne nécessite donc pas d'adjuvant* [une substance ajoutée pour renforcer l'alerte au système immunitaire], explique la Dr Marie Lachâtre. *Dans le cas du Covid-19, dix candidats vaccins utilisent des adénovirus. Toutefois, une immunité préexistante à ces vecteurs circulants par ailleurs peut affaiblir la réponse.* » À l'inverse, *« le vecteur lui-même peut conserver une pathogénicité résiduelle et provoquer une infection, voire disséminer à un tiers. Pour éviter ces problèmes, le vaccin Oxford/Astra Zeneca utilise un adénovirus de chimpanzé pour lequel aucune immunité n'existe chez l'humain. »* Selon les résultats de phase 3 publiés dans *The Lancet* le 8 décembre, son efficacité est comprise entre 62 % et 90 % selon les doses utilisées lors des deux injections, et aucune alerte d'effet secondaire sévère ou grave n'est rapportée.

Le vaccin développé par l'Institut Pasteur utilise, lui, son vecteur rougeole, stable et bien connu, pour échapper à ces inconvénients. *« C'est celui qui offre le plus de garanties »*, assure Marie Lachâtre. Mais il est sensiblement plus complexe et plus long à développer. Seul un essai de phase 1 sur 90 participants est en cours en France. En attendant, ce sont les formules à adénovirus d'Oxford/Astra Zeneca et Janssen qui doivent faire l'objet d'essais cliniques pilotés par Covireivac en France dès la mi-décembre.

3 Du coronavirus atténué ou inactivé

Il s'agit cette fois d'inoculer directement du coronavirus dans l'organisme, à ceci près qu'il a été préalablement soit inactivé, soit atténué. Dans le premier cas, un traitement chimique ou thermique lui ôte sa capacité à se répliquer dans les cellules. *« Le vaccin ne présente alors aucun risque infectieux, il est stable, avec des effets secondaires bien connus : douleur et rougeur au point d'injection, fièvre et douleurs musculosquelettiques*, détaille Marie Lachâtre. *Mais la technique manque d'immunogénicité et nécessite donc un adjuvant et plusieurs injections.* » C'est l'approche de Sinopharm et Sinovac en Chine depuis juillet : un million de personnes auraient déjà reçu leurs doses lors d'une campagne de vaccination d'urgence ciblée (aéroports, douanes, voyageurs d'affaires, etc.). Sinopharm a été homologué aux Émirats arabes unis en décembre.

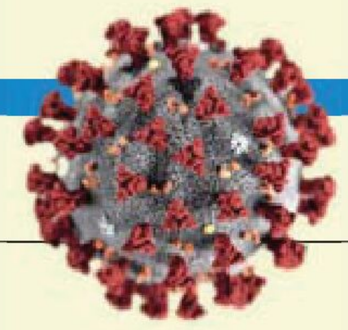
Deuxième possibilité : un coronavirus vivant mais atténué. C'est d'ailleurs la version la plus

CONSEIL D'ORIENTATION

Le Pr Alain Fischer en Monsieur Loyal de la vaccination

AFP

Le professeur Alain Fischer a été nommé président du Conseil d'orientation de la stratégie vaccinale en France par le Premier ministre Jean Castex. Un rôle un peu similaire à celui tenu par Jean-François Delfraissy à la tête du Conseil scientifique dédié, lui, à la gestion épidémiologique. Membre des Académies de médecine, des sciences, ancien membre du Comité national consultatif d'éthique, cofondateur de l'Institut des maladies génétiques Imagine, grand prix Inserm, connu pour ses travaux de thérapie génique sur les bébés bulles… Alain Fischer coche toutes les cases académiques pour la mission. Mais l'articulation entre le pouvoir politique, une population méfiante à plus de 50 % envers les vaccins et des entreprises sanitaires essorées par la crise risque de se transformer en casse-tête chinois.



ancienne de la vaccination qui utilise un virus affaibli pour infecter une personne sans la rendre malade. Variole, rougeole, oreillons, rubéole, varicelle, poliomyélite... La recette a fait florès. En principe, ces souches vaccinales sont obtenues par passages successifs de lignées virales sur des cultures cellulaires animales, au cours desquels elles perdent leur pouvoir pathogène. Mais la start-up américaine Codagenix a opté pour une nouvelle technique : une reprogrammation génétique du virus pour « désoptimiser » sa vitesse de réplication avant de l'inoculer. Ainsi, alors que le coronavirus Sras-CoV-2 peut produire quelque 100 millions de copies au sein d'une cellule en 24 heures, la version atténuée génétiquement permettrait de diviser ce rythme d'un facteur 1000 afin de donner le temps au système immunitaire de réagir. Pour l'instant, seul Codagenix s'est lancé dans cette voie, et le premier essai chez l'humain doit débuter en décembre.

4 Protéines recombinantes

Quatorze candidats vaccins différents sont développés à l'aide de protéines dites recombinantes. Ce sont des protéines fabriquées à partir de cellules modifiées par recombinaison génétique. Il s'agit de les introduire sans support, mais accompagnées d'un adjuvant capable d'alerter le système immunitaire sur le site d'injection. Sans ça, il ne considérera pas ces protéines recombinantes comme un danger. Cette technique, qui est utilisée contre l'hépatite B ou les papillomavirus humains, fait l'objet de trois essais de phase 3. Celui de Sanofi-GSK devrait entrer en phase 3 ce mois de décembre, et le laboratoire français table sur la production d'un milliard de doses à la fin 2021. ■

Hugo Jalinière
hugojaliniere

DERNIÈRES NOUVELLES

ALINE MORCILLO / HANS LUCAS / AFP

Les restaurants, les salles de sport et les hôtels sont les principaux lieux de contamination, selon une analyse menée grâce aux données téléphoniques de 98 millions d'Américains.

Restaurants et salles de sport à risque

Ce sont bien les restaurants, les bars, les hôtels et les salles de sport qui sont les principaux lieux de contamination au coronavirus. Des *hot-spots* infectieux identifiés aux États-Unis par l'analyse des mouvements de la population grâce aux données téléphoniques de 98 millions d'Américains. À Chicago par exemple, 85 % des contaminations ont eu lieu dans 10 % des lieux fréquentés par le public. Les restaurants auraient ainsi causé plus de 600 000 contaminations après leur réouverture.

SOURCE : SERINA CHANG ET AL., STANFORD UNIVERSITY, NATURE.

11 % de la population française déjà infectée

Selon une note de l'Institut Pasteur, 11,3 % de la population en France métropolitaine aurait déjà rencontré le coronavirus. L'Île-de-France est la région la plus touchée avec 21,3 % de la population atteinte, devant le Grand Est (15,2 %), l'Auvergne-Rhône-Alpes (14,3 %). La Bretagne reste la plus épargnée avec seulement 3,6 %. Des données obtenues par modélisation qui visent à « *décrire la dynamique épidémique plutôt qu'à fournir une estimation fine de l'immunité* », a précisé Simon Cauchemez, membre du Conseil scientifique. « *Il n'est pas impossible qu'on sous-estime le nombre réel de personnes contaminées* », selon le chercheur.

SOURCE : SIMON CAUCHEMEZ, INSTITUT PASTEUR.

6000 morts supplémentaires du cancer dus à la 1re vague

Les retards de prise en charge des patients atteints de cancers lors de la première vague de Covid-19 « *se traduiront par un excès de décès de 1000 à 6000 patients dans les années à venir* », selon la fédération Unicancer. La baisse du nombre de patients atteints de cancer pris en charge entre janvier et août atteint 23,3 % par rapport à 2019 selon le système national des données de santé.

Les pics de pollution vecteur de l'épidémie ?

Les particules fines de moins de 10 micromètres (PM10) et de moins de 2,5 micromètres (PM2,5) pourraient servir de vecteur au coronavirus en facilitant sa persistance dans l'air. Une étude a mis en évidence une troublante corrélation entre pics de pollution et rythme des hospitalisations en Suisse, à Londres et à Paris.

SOURCE : ANTOINE FLAHAULT, UNIVERSITÉ DE GENÈVE, EARTH SYSTEMS AND ENVIRONEMENT.

Les jumeaux numériques, nouveaux auxilliaires de santé

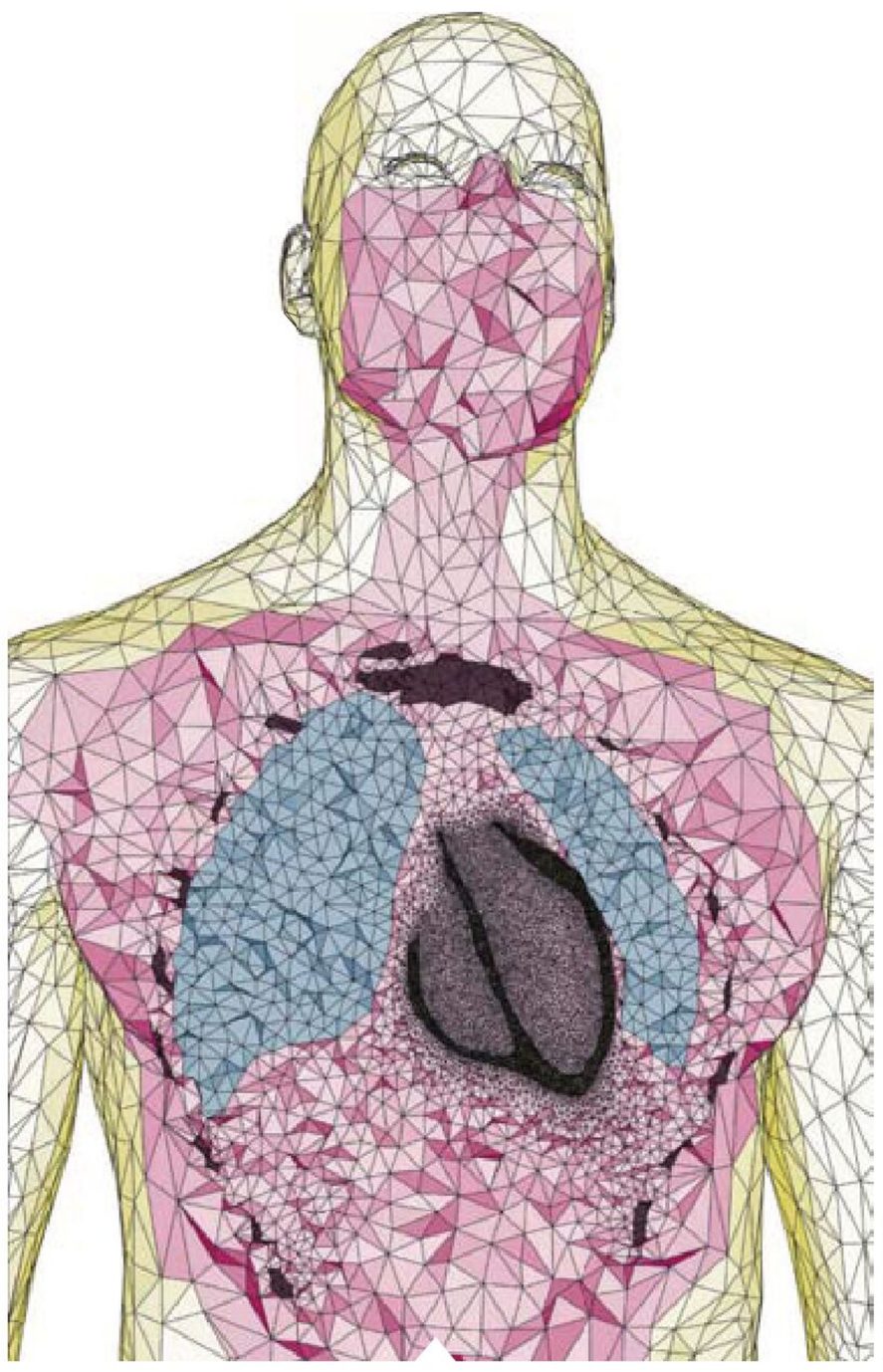
La modélisation informatique des organes du corps humain permet de simplifier les essais cliniques, d'assister le chirurgien, ou de tester de nouvelles molécules.

DES PIEDS AU CERVEAU, plus aucun organe du corps humain n'échappe à son jumeau numérique. Ces doubles virtuels sont conçus en mettant en équations les caractéristiques biologiques d'un patient : volume et architecture des organes, microstructure des tissus, types cellulaires et, désormais, jusqu'au niveau moléculaire. Avec pour objectif de simuler n'importe quel acte médical (traitement, geste chirurgical...) sur cette « copie » pour en prédire les éventuels effets secondaires, à l'instar de ce que réalise le monde de l'industrie — en particulier l'aéronautique — pour tester virtuellement toutes sortes de systèmes (avions, chaînes de production, etc.). Une technologie en passe de devenir incontournable dans le secteur de la santé.

Spécialiste de cette « virtualisation du monde », l'éditeur de logiciel français Dassault Systèmes a été l'un des premiers au monde à s'intéresser à ce domaine émergent. L'entreprise a même inscrit dans ses orientations stratégiques, dévoilées en 2020, le développement d'un jumeau numérique de corps entier, soit « *un modèle virtuel vivant, complet et personnalisable* », selon le communiqué. « *Nous souhaitons bien sûr à terme développer cette approche systémique*, prévient Claire Biot, vice-présidente de l'industrie des sciences du vivant chez Dassault Systèmes. *Mais il n'est pas nécessaire d'attendre de disposer du système corps humain complet pour obtenir des applications cliniques.* »

Sur sa plate-forme collaborative 3DExperience, lancée en 2012 à destination des industriels, une vingtaine d'approches médicales sont ainsi développées. Entre la modélisation des troubles musculosquelettiques du pied ou de la chirurgie du cerveau, la simulation de cœur Living Heart fait figure d'exemple. « *Nous avons déjà montré son intérêt pour planifier des opérations cardiaques, évaluer la cardiotoxicité d'un médicament ou tester un dispositif médical. Nous travaillons désormais avec la Food and Drug Administration (FDA)* [l'agence américaine du médicament] *pour montrer que les modélisations peuvent servir à simplifier les essais cliniques* », précise Claire Biot.

Ces études s'inscrivent en effet dans un axe stratégique majeur : accélérer les processus de validation de ces essais cliniques qui ont



INRIA / M3DISIM

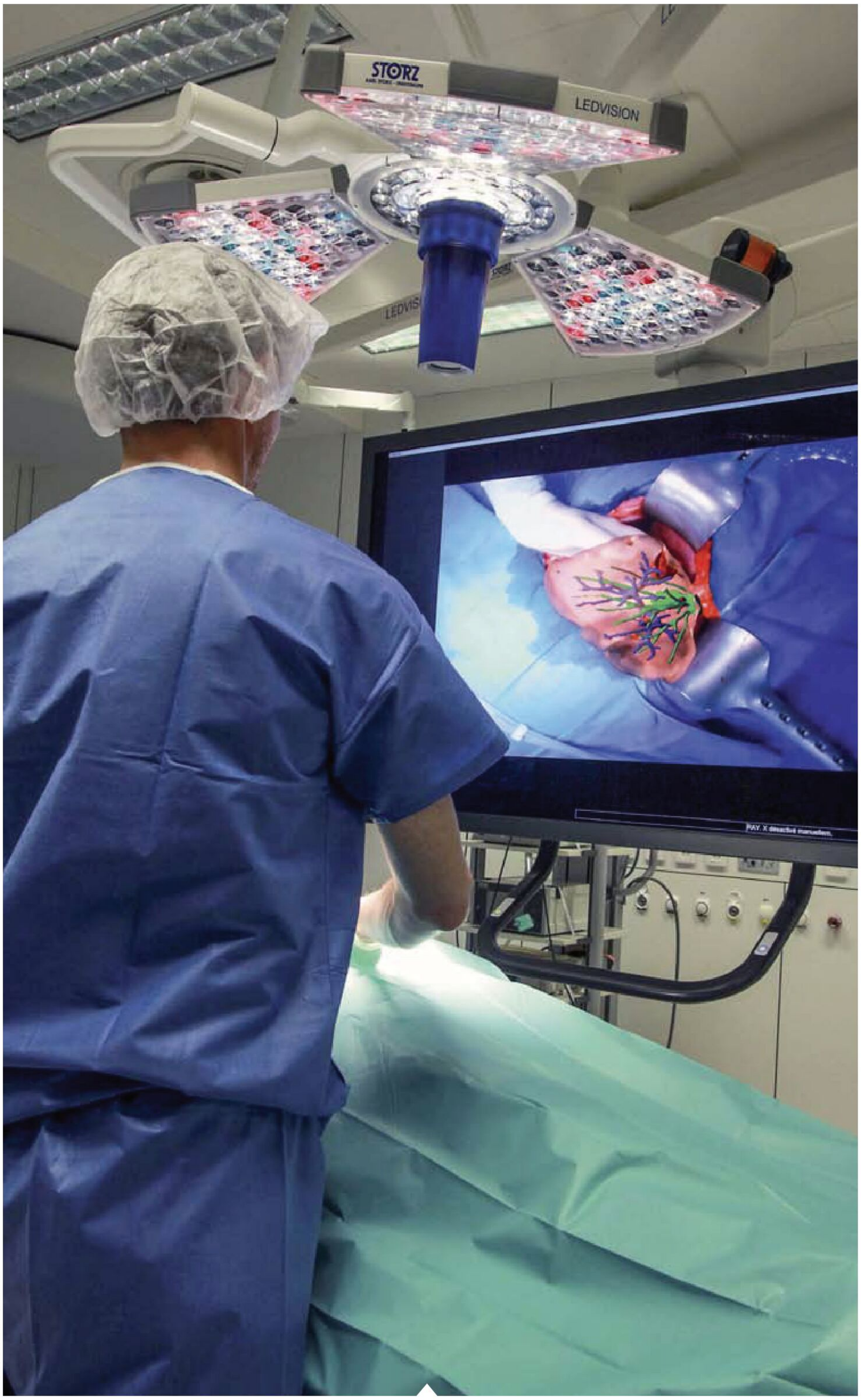
Ce maillage d'un thorax, réalisé par Inria, permet de calculer numériquement des électrocardiogrammes.

IRÈNE VIGNON-CLÉMENTEL Directrice de recherche Inria, équipe Reo

Optimiser le geste du chirurgien

« Nous venons de valider un système simplifié qui permet de décrire toute la dynamique des flux sanguins dans l'organisme, afin de représenter les différents organes. C'est ce que nous appelons une "preuve de concept" [démonstration de faisabilité] pour des modèles qui prennent uniquement le temps pour variable. L'équipe du Pr Éric Vibert, du Centre hépato-biliaire de l'hôpital Paul-Brousse à Villejuif (Val-de-Marne), voulait savoir s'il était possible de prédire les suites d'une ablation partielle du foie en fonction du volume d'organe retiré chez tel ou tel patient. Notre modèle devait donc être apte à indiquer au chirurgien jusqu'où aller dans la récession de l'organe sans risquer la défaillance du foie, un risque étroitement lié à la dynamique de la circulation sanguine. Ce qui a pu être fait avec succès comme nous l'avons montré dans une étude menée sur 47 patients publiée dans la revue *Journal of Hepathology*. »

S. SCAGNELLI/ INRIA



INRIA / F. NUSSBAUMER

Durant cette opération d'une tumeur du foie, une caméra placée au-dessus du patient filme en profondeur. Les images sont superposées avec un modèle numérique réalisé au préalable par l'équipe Mimesis d'Inria et l'hôpital Paul-Brousse (Villejuif) et affichées sur un écran pour guider le chirurgien.

de gros enjeux humains mais aussi financiers, comme le démontre la pandémie actuelle de Covid-19. En 2019, Dassault Systèmes a ainsi fait le plus gros investissement de son histoire, en rachetant la société Medidata *(lire l'encadré p. 74)*.

Un paysage complet de l'état cardiaque du patient

L'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria) est un autre pionnier du domaine. L'équipe M3DISIM travaille ainsi sur son propre modèle de cœur en collaboration avec le service d'anesthésie-réanimation de l'hôpital Lariboisière à Paris. « *Nous parvenons maintenant à "faire tourner" un jumeau numérique en temps réel pendant une intervention, au même rythme que celui du patient sous anesthésie générale*, explique Dominique Chapelle, directeur de recherche Inria. *Cela élargit le spectre du monitorage : au lieu de disposer de deux ou trois signaux vitaux, comme c'est le cas habituellement pour surveiller l'état du patient, nous bénéficions du paysage complet de son état cardiovasculaire grâce au jumeau.* » De quoi mûrir un projet de start-up pour mettre au point un système apte à faire des recommandations à l'anesthésiste. « In fine, *c'est un système de pilotage automatique complet que l'on pourra obtenir — comme il est d'usage dans l'aéronautique — en mettant les phénomènes en équation* », explique le chercheur.

La modélisation a en effet un atout majeur : elle permet de mettre en équations des phénomènes particuliers et individualisés pour suivre toutes les étapes par lesquelles passe le tissu ou l'organe auquel les scientifiques s'intéressent. Et c'est précisément cette approche qui distingue cette technique de ce qu'il est possible de faire avec l'intelligence artificielle (IA) qui procède, elle, par apprentissage statistique sur de ▶

Bionumérique

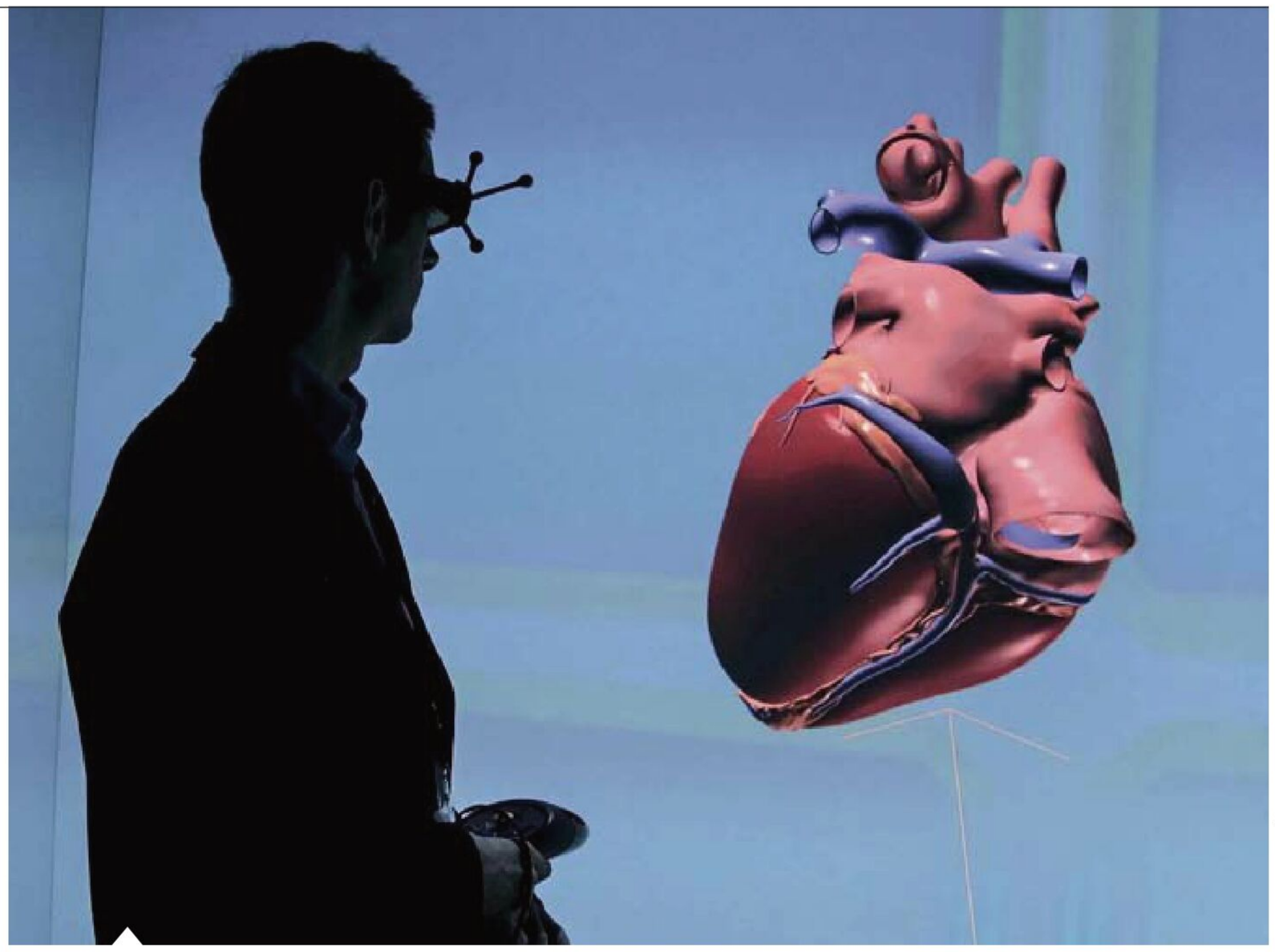
grandes bases de données. Si toutes deux ont une valeur prédictive, l'IA ne permet pas de retracer la chaîne de causalité expliquant le « pourquoi » de sa prédiction sur chaque patient, contrairement à la modélisation. « *Le fonctionnement du jumeau numérique est tout à fait interprétable. C'est un élément majeur en médecine pour savoir quoi faire, en particulier dans les cas rares, moins accessibles aux statistiques* », relève Dominique Chapelle.

Décrire les tissus jusqu'à l'échelle moléculaire

En outre, les équations biophysiques permettent de décrire des tissus à toutes les échelles. « *Pour notre jumeau du cœur, nous sommes descendus à l'échelle moléculaire en modélisant l'action de la myosine, une protéine qui pilote la contraction des cellules cardiaques*, poursuit le chercheur. » L'équipe travaille aussi sur les poumons avec l'hôpital Avicenne de Bobigny (Seine-Saint-Denis) pour mieux comprendre les cas de fibroses pulmonaires dits idiopathiques, dont on ignore les causes. Le jumeau numérique permet alors de tester les hypothèses. Et de remonter la chaîne de causalité menant à la progression de la maladie dans les poumons. Dans le contexte de la crise sanitaire, ces travaux ont reçu un financement de l'Agence nationale de la recherche pour le suivi des convalescents du Covid-19, dont l'une des séquelles est justement la fibrose pulmonaire.

« *Les technologies sont mûres pour de grandes avancées* », note Irène Vignon-Clémentel, directrice de recherche Inria, spécialisée en modélisation de la circulation sanguine. Son équipe vient d'apporter une démonstration du modèle dans la chirurgie du foie. Mais des obstacles demeurent. « *Les processus de validation de nos modèles sont longs et posent parfois des problèmes éthiques*, explique la chercheuse. *Il faut en effet confirmer leurs prédictions par les données cliniques après l'intervention sur le patient. Or nous ne pouvons pas toujours réaliser toutes les mesures nécessaires, ne serait-ce que parce qu'il faut laisser le patient se reposer.* » De quoi faire douter Dassault Systèmes pour son projet de jumeau numérique du corps entier ? Non selon Claire Biot : « *Peu de gens croyaient à des jumeaux numériques d'avions entiers voilà trente ans. Aujourd'hui, ces modèles sont omniprésents et incontournables.* » Avec, peut-être, une nuance pour le cerveau. « *Il s'agit d'un organe majeur qui échappe encore largement à nos capacités de modélisation* », prévient Dominique Chapelle. L'association IA et modélisation y parviendra-t-elle un jour ? ■

Hugo Jalinière @hugojaliniere



DASSAULT SYSTÈMES

Le projet Living Heart (« cœur vivant »), de Dassault Systèmes, vise à créer des simulations et des modèles de l'organe afin de favoriser la mise au point de traitements et de dispositifs médicaux cardio-vasculaires.

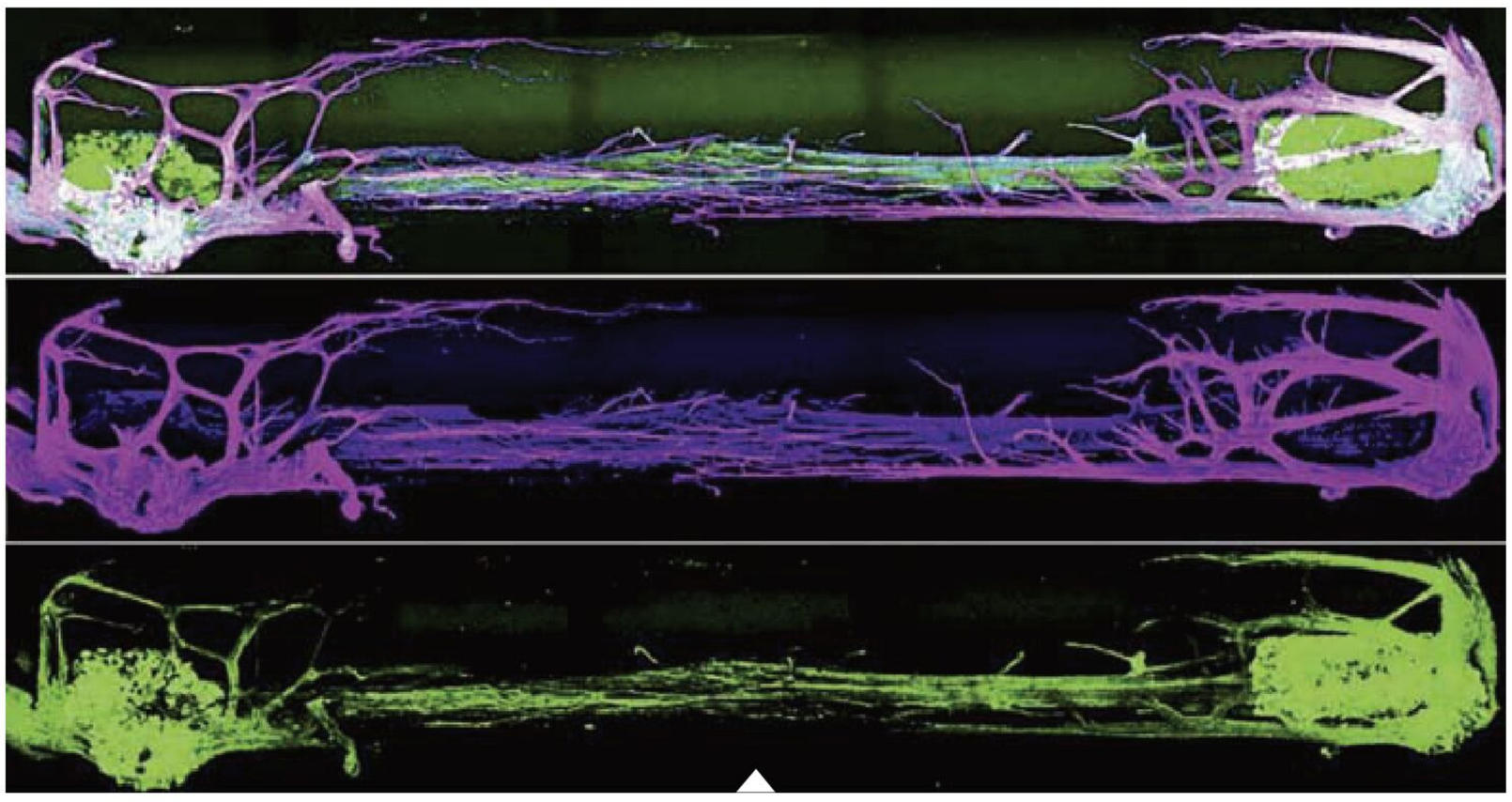
ESSAIS CLINIQUES

Accélérer le développement de molécules

Remplacer les phases sur l'animal et les essais précoces chez l'humain par des jumeaux numériques. C'est la tendance suivie par l'Agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux (FDA) dans le but d'accélérer les mises sur le marché de molécules ou de dispositifs médicaux. Avec le français Dassault Systèmes, la FDA teste ainsi l'intégration de « bras synthétiques de contrôle » dans des essais sur le glioblastome, la tumeur cérébrale la plus fréquente, ou sur l'évaluation d'un dispositif de réparation de valve cardiaque. Les groupes de patients virtuels étant constitués à partir des données d'essais cliniques précédents, Dassault Systèmes a racheté en 2019, pour 5,8 milliards de dollars, la société américaine Medidata dont les logiciels collectent les résultats d'un essai sur deux dans le monde. Elle recense ainsi les données de 20 000 études cliniques dont 6000 en cours, y compris sur le vaccin à ARN de Moderna contre le Covid-19. À terme, l'idée est de tester la pharmacocinétique des médicaments et d'éclairer les médecins sur les interactions difficiles à établir au-delà de deux ou trois molécules.

Des électrodes « vivantes » à implanter dans le cerveau

Des chercheurs proposent de remplacer les électrodes métalliques par des équivalents constitués de cellules nerveuses génétiquement modifiées mieux tolérés par l'organisme.



KACY CULLEN

Les fibres nerveuses qui transportent le signal électrique (vues ici sous trois éclairages différents) croissent pour former des électrodes vivantes sensibles à la lumière, qui pourraient aider à traiter l'épilepsie ou Parkinson.

C'EST UN ESPOIR POUR TOUS LES PATIENTS dont la maladie est traitée par une stimulation profonde du cerveau — en premier lieu l'épilepsie et Parkinson : une équipe américaine de l'université de Pennsylvanie a mis au point des « électrodes vivantes » qui pourraient pallier les défauts des électrodes classiques. Il arrive en effet que celles-ci provoquent une réponse immunitaire de l'organisme entraînant des lésions ou des effets secondaires dommageables pour les neurones situés autour de la zone d'implantation. Les scientifiques proposent de remplacer les électrodes métalliques par des équivalents constitués de cellules nerveuses génétiquement modifiées pour répondre à des signaux lumineux — une approche appelée « optogénétique ». Ces cellules deviennent sensibles à la lumière en exprimant une protéine photosensible, la channelrhodopsine. Afin d'acheminer la lumière jusqu'à la zone du cerveau à stimuler, les chercheurs ont envisagé une sorte de fibre optique composée de cellules « vivantes ».

Pour construire ce dispositif, pas moins de 10 000 cellules ont été modifiées en laboratoire pour exprimer la channelrhodopsine et réagir à la lumière. Elles ont été placées au sommet d'un cylindre de gel soluble, dont le diamètre ne dépasse pas deux fois celui d'un cheveu humain. Les cellules se développent alors le long du cylindre jusqu'à poursuivre au-delà, formant des axones, les fibres nerveuses qui transportent le signal électrique. Quand ces cylindres ont atteint 1,5 mm de long, ils ont été implantés dans le cerveau de rongeurs. Un réseau de LED disposées sur la surface du cerveau a alors permis d'activer les axones dans le cylindre, désormais reliés au cerveau du rongeur. Ces axones peuvent ensuite stimuler la zone à laquelle ils sont connectés au bout du tube, en atténuer l'activité ou faire les deux selon la nature des cellules implantées.

Une réduction des réactions immunitaires

Outre une très bonne tolérance du dispositif par le système immunitaire, ce dispositif fonctionnant par signal lumineux serait plus efficace que ceux faisant appel à des impulsions électriques. À l'avenir, il pourrait être encore perfectionné en recourant à des cellules souches génétiquement modifiées qui permettraient d'éviter tout rejet immunitaire chez le patient. De façon générale, cette approche devrait réduire les réactions immunitaires car elle n'implique plus d'introduire des matériaux métalliques en profondeur dans le cerveau. Si les tests chez l'humain ne sont pas encore à l'ordre du jour, les scientifiques espèrent que, à terme, les électrodes organiques pourraient même modifier les connexions établies dans le cerveau et supprimer les connexions parasites responsables de maladies. ■

Coralie Lemke @CoralieLemke

Les multiples atouts de l'huître

Ce mollusque peu calorique, riche en oligo-éléments et en protéines, trouve naturellement sa place sur la table des repas de fêtes.

LES HUÎTRES OCCUPENT UNE PLACE DE CHOIX à table, notamment lors des fêtes de fin d'année : Belon, Marennes-d'Oléron, Bouzigue... Déjà les Romains en faisaient le commerce. Les rois de France Henri IV, François Ier et Louis XIV étaient également de grands amateurs du mollusque bivalve. Aujourd'hui, les Français en dégustent 2 kg par an et par personne. L'huître la plus cultivée est la creuse *Crassostrea gigas*, originaire des côtes chinoises et japonaises. Elle a remplacé dans les élevages l'huître portugaise *Crassostrea angulata* anéantie par une maladie dans les années 1960. Plus rare, l'huître plate (*Ostrea edulis*) est élevée en Bretagne nord sous le nom de belon, dans le bassin de Thau ou dans le bassin d'Arcachon (gravette). Reconnue pour ses qualités nutritionnelles, l'huître est très surveillée car elle peut parfois être responsable d'intoxications alimentaires.

Trois à quatre ans d'élevage sont nécessaires avant qu'une huître soit commercialisée. Les larves (naissains) se développent sur des collecteurs installés en mer, puis les coquillages sont décrochés les uns des autres afin d'être disposés dans des poches sur des tables, toujours en mer. Leur croissance se poursuit ainsi durant deux à trois ans. Les mollusques sont ensuite affinés dans des bassins d'eau de mer (les claires) en « fines » ou « spéciales ». Depuis 2001, des huîtres *Crassostrea gigas* triploïdes ont été mises au point par l'Ifremer. Plus charnues, elles sont produites en écloseries et commercialisées auprès des ostréiculteurs qui les élèvent dans leurs parcs. L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a confirmé l'innocuité de cette huître pour le consommateur et l'absence de risques pour l'environnement (1).

2 kg

d'huîtres sont consommées en moyenne par personne chaque année en France, premier pays producteur d'Europe devant l'Irlande.

(SOURCE : COMITÉ NATIONAL DE LA CONCHYLICULTURE.)

Elle est pauvre en lipides

L'huître est une bonne source de protéines (8,64 g/100 g). Peu calorique (67 kcal/100 g), elle est pauvre en lipides (1,91 g/100 g) et fournit en petites quantités des acides gras polyinsaturés (0,35 g/100 g) dont certains de la famille des oméga-3 (acide eicosapentaénoïque [EPA], acide docosahexaénoïque [DHA]) qui ont des effets protecteurs reconnus sur la fonction cardio-vasculaire. Huit huîtres (100 g) apportent 20,3 mg de cholestérol mais c'est moitié moins que 100 g de cabillaud cuit (46,5 mg) et un quart de moins que 100 g de steak haché à 5 % de matière

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

HUÎTRES TRIPLOÏDES Obtenues par croisement d'un mollusque tétraploïde avec un individu diploïde. Ces huîtres comptent en réalité 10 lots de trois chromosomes identiques au lieu de 10 lots de deux chromosomes. Stériles et donc sans laitance, elles grossissent plus vite que les diploïdes.

ACIDE GRAS POLYINSATURÉS Lipides comportant au moins deux doubles liaisons. On distingue les oméga-6, parmi lesquels l'acide linoléique (LA) et l'acide arachidonique, et les oméga-3, comprenant l'acide alpha-linolénique (ALA), l'acide eicosapentaénoïque (EPA) et l'acide docosahexaénoïque (DHA).

LAITANCE Semence produite par l'huître, ressemblant à une substance blanchâtre, elle contient le sperme et les ovules du mollusque.

grasse (88 mg) (2). À noter, les huîtres diploïdes — à l'inverse des triploïdes, stériles — peuvent être laiteuses de mai à août, leur période de reproduction.

Elle renforce l'immunité et prévient l'anémie

Le mollusque apporte de la vitamine D (0,5 µg/100 g), laquelle joue un rôle immunomodulateur (3), ainsi qu'un cinquième des besoins journaliers en sélénium, un minéral aux effets antioxydants et anti-inflammatoires (4). 100 g d'huîtres couvrent l'ensemble des besoins journaliers en cuivre, anti-infectieux et anti-inflammatoire et jusqu'à trois fois ceux en zinc (21,8 mg/100 g). Une étude menée chez des personnes âgées montre qu'une supplémentation en zinc (30 mg par jour) améliore la multiplication des globules blancs, les lymphocytes T, face à une infection (5). Huit huîtres creuses fournissent 2 mg de fer, nécessaire à la fabrication de l'hémoglobine, une protéine présente dans les globules rouges permettant de transporter l'oxygène des poumons vers les tissus. L'huître renferme des quantités importantes de vitamine B12, essentielle au fonctionnement normal du système nerveux et à la formation des globules rouges. 100 g en affichent 28,6 µ, 11 fois plus que les apports conseillés quotidiens (2,5 µg/jour). Par ailleurs, elle contient de la taurine, un antioxydant qui pourrait aider à diminuer la tension artérielle (6) et est également intéressante pour sa teneur en iode (101 µg/100 g) indispensable au bon fonctionnement de la thyroïde.

Attention au sodium, aux allergies et intoxications

En cas d'hyperthyroïdie et d'hypertension artérielle, il est déconseillé de consommer des huîtres en raison de leur richesse en sodium (566 mg/100 g). Prudence aussi pour ce qui concerne leur teneur en purine, un précurseur de l'acide urique : les personnes souffrant d'une forme d'arthrite nommée goutte doivent en limiter la consommation. Tout comme les enfants, les femmes enceintes et allaitantes en raison des risques de toxi-infections alimentaires *(lire aussi l'encadré)*. Par ailleurs, les personnes allergiques aux acariens peuvent avoir des prédispositions à être allergiques aux mollusques de mer en raison du risque de réaction croisée.

Bien la choisir

On peut se fier au Label Rouge, dont les huîtres de Marennes-Oléron (Fine de claire et Pousse en claire) sont les seules à bénéficier. La mention « ostréiculteur traditionnel, huîtres nées en mer », une marque déposée par l'association Ostréiculteur traditionnel, garantit l'achat d'huîtres diploïdes captées et élevées en pleine mer. En revanche, le label bio ne certifie pas la manière dont sont nées les huîtres. Les mollusques triploïdes peuvent être dégustés toute l'année, sous l'appellation « huître des quatre saisons », tandis que les diploïdes sont commercialisées durant les mois en r, en dehors de leur période de reproduction. Le calibre, taille de l'huître, est désigné par un numéro, de 0 à 5 pour les creuses, et de 000 à 6 pour les plates. Plus le chiffre est faible, plus l'huître est grosse. Après l'achat, le coquillage se conserve huit à dix jours au maximum, à une température comprise entre 5 et 15 °C. Il ne faut pas le consommer s'il reste entrouvert. ■

Sylvie Boistard
@syboistard

SOIZICK LE GUYADER Virologiste, responsable du laboratoire de Santé, environnement et microbiologie de l'Ifremer (Nantes)

Améliorer la sécurité du consommateur

« Les huîtres sont un aliment à risque d'intoxication alimentaire malgré la mise en place d'une norme sanitaire fondée sur des critères bactériens, comme la présence d'*Escherichia coli* pouvant entraîner, dans ses formes graves, des insuffisances rénales. Parfois contaminées par des norovirus, elles sont aussi impliquées dans des épidémies de gastro-entérites aiguës, des pathologies relativement bénignes. D'origine fécale strictement humaine, ces virus peuvent contaminer les eaux du littoral lors de débordement des stations d'épuration à la suite de fortes pluies. Or les norovirus survivent plusieurs semaines dans la chair de l'huître. Nous travaillons donc sur de nouvelles méthodes de détection qui vont contribuer à mieux couvrir et diminuer ce risque viral et améliorer la sécurité du consommateur. »

(1) Avis relatif à la présentation d'éléments scientifiques d'appréciation de l'équivalence des huîtres Crassostrea gigas triploïdes par rapport à des organismes diploïdes ou sauvages, Anses, 2001.

(2) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(3) Modulation of the immune response to respiratory viruses by vitamin D, Greiller CL. et al, *Nutrients*, 2015.

(4) Selenium and human health, Rayman M. et al, *The Lancet*, 2012.

(5) Effect of zinc supplementation on serum zinc concentration and T cell proliferation in nursing home elderly : a randomized, double-blind, placebo-controlled trial, Barnett JB. et al, *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2016.

(6) The Effects of Oral Taurine on Resting Blood Pressure in Humans: a Meta-Analysis, Waldron M. et al, *Current Hypertension Reports*, 2018.

Bristol Myers Squibb™

Cancer : la thérapie cellulaire CAR-T, une forme d'immunothérapie en plein essor

En moins de 10 ans, l'immunothérapie a révolutionné la lutte contre le cancer[1]. Parmi ses différentes approches, les CAR-T, qui combinent thérapie génique et thérapie cellulaire[2], constituent une nouvelle source d'espoir dans le traitement de certains cancers du sang, comme les leucémies, les lymphomes et le myélome multiple.

En ce domaine, l'entreprise biopharmaceutique Bristol Myers Squibb est mobilisée pour apporter aux patients des innovations thérapeutiques.

C'est à présent un fait établi : à l'origine du cancer se trouvent des cellules anormales[3] qui prolifèrent de manière incontrôlée, notamment parce qu'elles échappent progressivement à la surveillance de nos défenses immunitaires qui ne parviennent plus à les détruire . En situation normale, il existe des mécanismes pour réguler l'immunité. Mais quand un cancer se développe, les cellules de la tumeur détournent ces mécanismes de régulation. Les lymphocytes T, ces globules blancs « soldats » de l'immunité, sont alors inactivés et les tumeurs échappent à la destruction[4]. Cette découverte scientifique a été à l'origine d'un changement d'approche thérapeutique révolutionnaire.

Qu'est-ce que l'immunothérapie ?

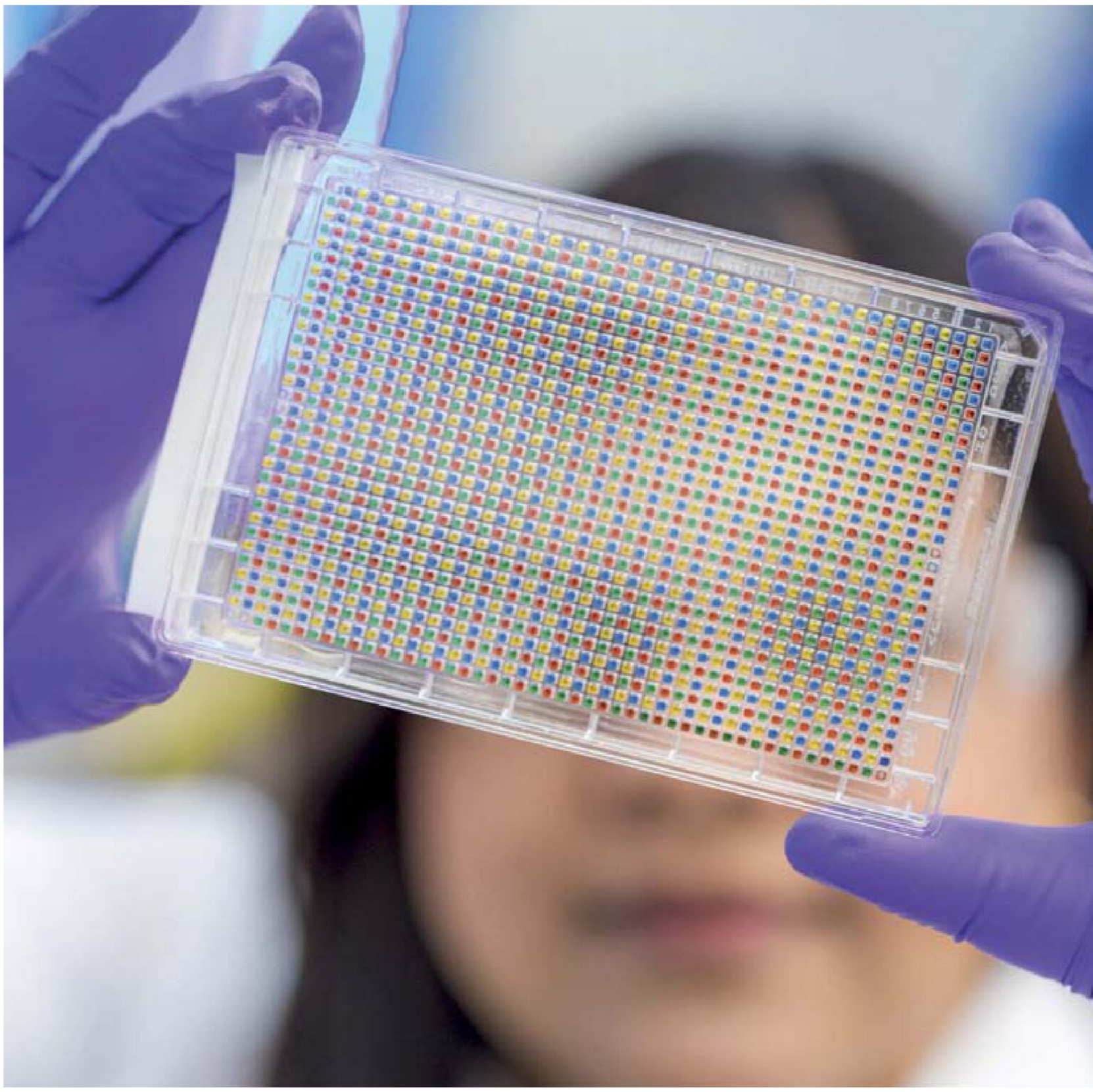
Au lieu de détruire directement les cellules cancéreuses, mais aussi des cellules saines

environnantes, comme le font la radiothérapie, la chimiothérapie et les thérapies ciblées, les immunothérapies visent à « réveiller » le système immunitaire afin qu'il s'en charge. Les lymphocytes T peuvent donc à nouveau reconnaître, attaquer et détruire les cellules tumorales[5].

Des milliers de malades souffrant de mélanome malin, de carcinome à cellules de Merkel, de carcinome épidermoïde cutané (des formes de cancers de la peau), de certaines formes de cancer du poumon, de la vessie, du rein, de cancer de la tête et du cou (de la sphère ORL) ou encore de lymphome de Hodgkin (cancer du sang) ont déjà été ou sont traités par immunothérapie. Chez certains patients, la réponse est durable[6,8] et le cancer est maintenu sous contrôle.

La thérapie cellulaire CAR-T, un nouvel espoir

Parmi les différentes stratégies d'immunothérapie, la plus récente, les CAR-T, consiste à concevoir un traitement unique pour chaque patient à partir de ses propres lymphocytes T. A l'heure actuelle, en France, une vingtaine de centres experts sont habilités à traiter les patients par thérapie CAR-T[7]. Les lymphocytes T du patient sont prélevés par aphérèse[8] (technique de tri des cellules sanguines) et envoyés dans un laboratoire spécialisé (pour le moment, le plus souvent aux Etats-Unis). Les lymphocytes T sélectionnés sont alors modifiés génétiquement pour fabriquer à leur surface des récepteurs spécifiques (« récepteurs antigéniques chimériques », CAR en anglais), qui leur donnent la capacité de reconnaître spécifiquement la tumeur dont le patient est atteint. À ce stade, on ne parle plus de lymphocytes T mais de cellules CAR-T. Ces dernières se multiplient in vitro avant d'être renvoyées à l'hôpital pour être réinjectées



au patient. Une seule perfusion suffit et les CAR-T continuent à se multiplier pour agir dans l'organisme du patient[9,12].

Administrer cette thérapie de pointe requiert des plateaux techniques et des compétences très spécifiques, ainsi qu'une parfaite coordination entre les différents départements impliqués : hématologie, réanimation, pharmacie, neurologie[10]...

Cette forme d'immunothérapie individualisée en est encore à ses prémices et beaucoup de questions scientifiques restent à élucider. Toutefois, avec des résultats parfois spectaculaires, la thérapie CAR-T est porteuse de nouveaux espoirs pour les patients atteints de certains cancers du sang réfractaires aux traitements traditionnels ou en rechute[11,12].

[1] https://www.frm.org/recherches-cancers/immunotherapie
[2] https://www.inserm.fr/information-en-sante/c-est-quoi/sans-mario-c-est-quoi-car
[3] https://www.e-cancer.fr/Comprendre-prevenir-depister/Qu-est-ce-qu-un-cancer/Le-ou-les-cancers
[4] https://www.e-cancer.fr/Patients-et-proches/Se-faire-soigner/Traitements/Therapies-ciblees-et-immunotherapie-specifique/Immunotherapie-mode-d-action
[5] Institut National du Cancer. Les immunothérapies spécifiques dans le traitement des cancers. Rapport. Mai 2018 (cf page 3, introduction)
[6] Ribas et al., Science 359, 1350–1355 (2018)
[7] https://www.francelymphomeespoir.fr/contenu/comprendre/comment-soigner-un-lymphome/les-car-t-cells (cf question 12 "Les centres agréés en France")
[8] https://www.e-cancer.fr/Actualites-et-evenements/Actualites/REGARD-SUR-les-medicaments-d-immunotherapie
[9] https://www.francelymphomeespoir.fr/contenu/comprendre/comment-soigner-un-lymphome/les-car-t-cells (cf question 6 "Comment se déroule concrètement le traitement avec des CAR-T cells ?")
[10] https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000038353958?tab_selection=all&searchField=ALL&query=CAR-T+Cells&page=1&init=true
[11] Rapport d'activité 2019, INCa (p. 19)
[12] https://www.e-cancer.fr/Actualites-et-evenements/Actualites/REGARD-SUR-les-medicaments-d-immunotherapie

HEFR2000934-01 - NP - Octobre 2020

Le patrimoine spatial sous la loupe des archéologues

Un nouveau domaine d'étude émerge avec l'analyse par des chercheurs de tous les objets lancés par les humains depuis Spoutnik en 1957 jusqu'aux milliers de débris qui orbitent aujourd'hui autour de la Terre.

Par Bernadette Arnaud @NarudaaArnaud

STATION SPATIALE INTERNATIONALE habitée orbitant au-dessus de nos têtes, sondes Voyager voyageant aux confins du système solaire, rovers américains ou chinois arpentant la surface de la Lune... Jusque-là plutôt tourné vers le sol, le regard des archéologues se braque désormais vers le ciel où des milliers d'objets de toute sorte fabriqués par *Homo sapiens* ont été expédiés depuis le début du XXe siècle. « *Quels sont les premiers à avoir été lancés ? Peut-on en faire l'inventaire ? Comment assurer leur protection au titre du patrimoine ?* », s'interroge Alice Gorman, chercheuse à l'université Flinders d'Adélaïde (Australie), pionnière depuis 2003 d'une nouvelle discipline des sciences sociales désormais en plein essor dans le monde anglo-saxon : l'archéologie de l'espace. « *Tous les objets que les humains ont lancés depuis Spoutnik, le premier à avoir atteint l'orbite terrestre en octobre 1957, mérite notre intérêt. Tout comme les interactions des humains avec eux* », explique la spécialiste qui distingue son activité — l'étude de toutes les productions de la culture matérielle humaine en lien avec l'espace — de celle des historiens de l'espace ou de l'archéologie spatiale qui utilise les images satellite et autres systèmes de télédétections embarqués (lidar) pour repérer de nouveaux sites à la surface de la Terre.

Plus de 180 tonnes de matériel laissées sur la Lune

C'est sans doute à force d'admirer les cieux de l'hémisphère Sud, nuit après nuit, qu'Alice Gorman a abandonné les travaux qu'elle menait sur le patrimoine aborigène pour se consacrer à cette spécialité alors émergente. « *Il y a vingt ans, nous n'étions qu'une poignée d'archéologues à nous intéresser à ce domaine* », poursuit celle qui s'est fait connaître depuis sous le surnom de Dr Space Junk (Dr Débris Spatiaux). Elle a été rejointe depuis par d'autres spécialistes, telle Beth Laura O'Leary, du Département d'anthropologie de l'université d'État du Nouveau-Mexique (États-Unis). La chercheuse travaille sur les sites d'alunissage, notamment la base de la Tranquillité utilisée par le programme Apollo 11 (1969). Elle y a recensé 109 objets abandonnés par l'équipage et a reçu pour cela un prix de la Nasa honorant la valeur historique et scientifique de ses recherches. « *Il y a plus de 180 tonnes de matériel sur la surface de la Lune qu'il faut préserver et protéger !* », rappelle-t-elle. En 1969, lorsque l'équipage d'Apollo 11 s'est posé sur notre satellite, pas moins de 26 engins spatiaux provenant des États-Unis ou de l'URSS s'étaient en effet déjà écrasés ou avaient atterri à sa surface. « *Tous doivent être considérés comme des objets archéologiques au même titre que les grottes ornées ou les pyramides d'Égypte* », soutient ▶

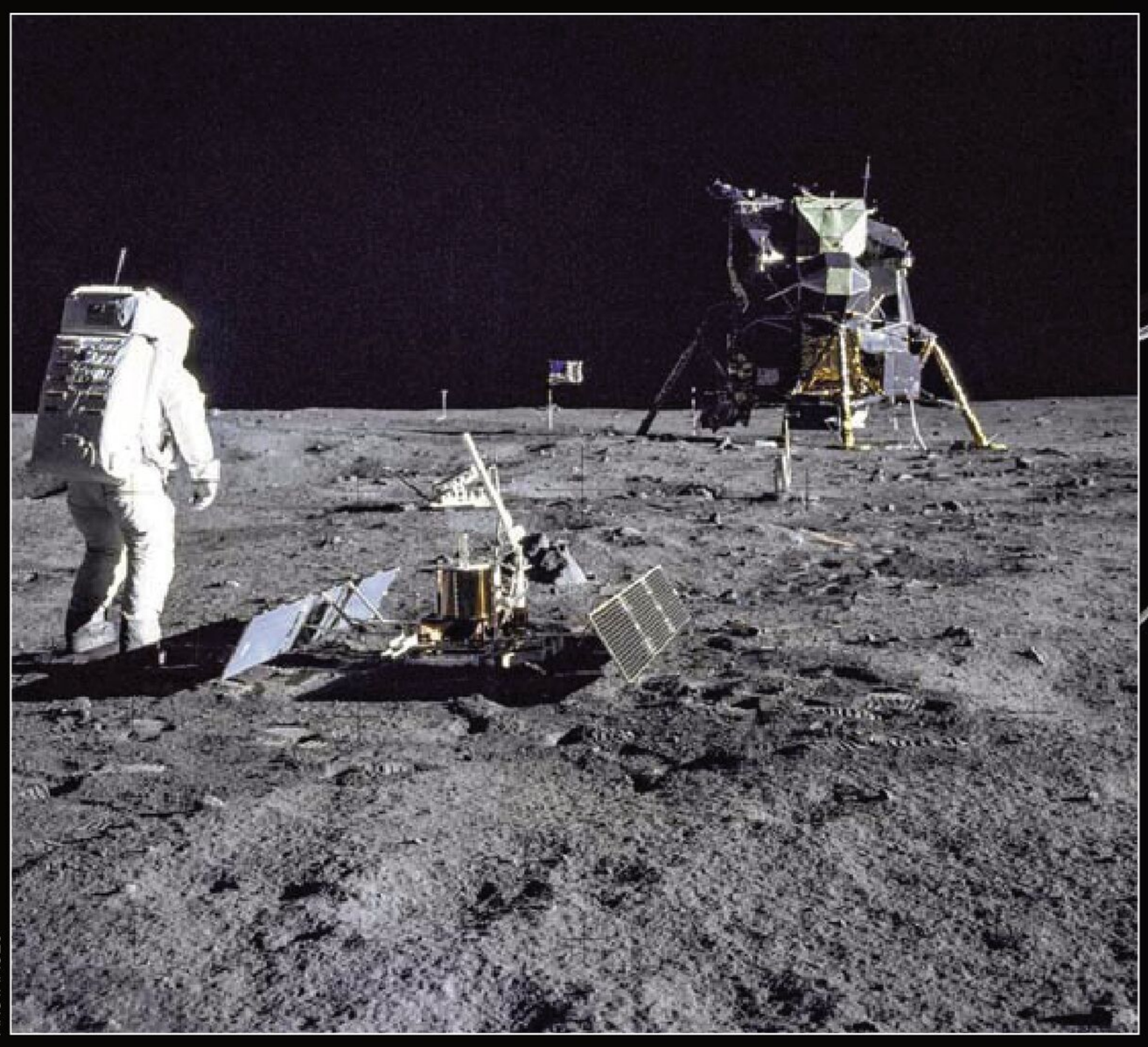
DANIEL KUKEC

« [Ces vestiges] doivent être considérés comme des objets archéologiques, au même titre que les pyramides... »

Alice Gorman, archéologue de l'espace, université Flinders, à Adélaïde (Australie)

CARLA CIOFFI/NASA/CARLA CIOFFI

Baïkonour (1976). La base spatiale de lancement russe est la plus ancienne au monde. Les répercussions dans le temps de telles installations sur les habitants vivant à proximité sont également étudiées par les archéologues de l'espace.



AKG IMAGES

Apollo 11 (1969). 109 objets, abandonnés par les astronautes américains lors de cette mission, ont été recensés sur la base de la Tranquillité.

ERIC LONG / SMITHSONIAN INSTITUTION

Spoutnik 1 (1957), le premier satellite mis en orbite par les Soviétiques, a cessé d'être opérationnel 21 jours après son lancement. Il a alors évolué de manière incontrôlée jusqu'à sa rentrée dans l'atmosphère 71 jours plus tard.

Clyde Tombaugh (1906-1997), planétologue américain.

Timothy Leary (1920-1996), écrivain américain.

Gene Roddenberry (1921-1991), scénariste et producteur américain.

Eugene Shoemaker (1928-1997), planétologue américain.

PHOTOS : AP/SIPA - AFP - SIPA - USGS

SÉPULTURES ORBITALES

L'espace est aussi une nécropole

L'espace a aussi ses drames, un thème auquel s'intéressent les archéologues de l'espace comme ils le feraient pour une nécropole. Laïka, la chienne du satellite soviétique Spoutnik 2, serait ainsi l'une des premières victimes de la conquête spatiale (1957), tout comme les trois astronautes du programme Apollo 1, morts brûlés dans leur vaisseau spatial lors d'une répétition au sol en 1967. Ou le cosmonaute Vladimir Komarov, disparu au moment de la rentrée dans l'atmosphère de la capsule Soyouz 1 en raison du mauvais fonctionnement du parachute (1967). Trois cosmonautes soviétiques ont également trouvé la mort en 1971 lorsque leur véhicule Soyouz, revenant de la station spatiale Saliout 1, a subi une brusque décompression... Les plus grands désastres étant bien entendu ceux de la navette américaine Challenger, juste après le décollage, en 1986, entraînant la mort des sept membres de l'équipage ou la désintégration de la navette Columbia lors de son retour sur Terre, en 2003. Mais l'espace accueille aussi les cendres de Terriens... Ainsi la sonde New Horizon, lancée en 2006, a-t-elle emporté à son bord l'urne de l'astronome Clyde Tombaugh, le découvreur de Pluton. Et la sonde Lunar Prospector a été volontairement précipitée sur la Lune avec à son bord les cendres d'Eugene M. Shoemaker, le découvreur de la comète du même nom. Les restes de bien d'autres personnalités comme Gene Roddenberry, créateur de *Star Trek* ou l'écrivain Timothy Leary, sont également en orbite (*photos ci-dessus*).

Beth Laura O'Leary. « *Cela va des antennes paraboliques qui suivent les objets célestes et des stations spatiales, aux lieux d'atterrissage ou aux sondes et autres sites de lancement* », renchérit Alice Gorman.

Ainsi, l'un des grands thèmes d'investigation de ces spécialistes concerne les 80 00 tonnes de déchets spatiaux qui, selon la Nasa, orbitent au-dessus de nos têtes. « *Notre planète est encerclée d'une couche dense de ce que l'on appelle les "débris en orbite basse", des fragments d'environ 10 cm, et les "débris en orbite géostationnaire", ceux approchant le mètre sans parler les millions de déchets ne dépassant pas le centimètre* [on parle de 170 millions de débris spatiaux en orbite] », explique Alice Gorman. Un espace poubelle où circulent des reliquats de sondes, de satellites de télécommunication, de boulons, de fusées... qui représentent un risque de collision de plus en plus important pour les autres engins. Ainsi, récemment, l'orbite du télescope CHEOPS a dû être modifiée pour qu'il ne soit pas percuté. « *Or personne ne dispose de l'inventaire complet de ces déchets. C'est pourquoi nous étudions l'ensemble des satellites envoyés dans l'espace depuis le début de la conquête spatiale pour les identifier et les repérer.* »

À ce titre, Alice Gorman s'intéresse aussi aux « yoyos », ces petites masses attachées à des filins que les engins spatiaux libéraient en fin de phase de propulsion pour arrêter leur rotation. « *Destinés à empêcher les satellites de tourner à grande vitesse une fois éjectés des fusées, ils sont caractéristiques des satellites météorologiques TIROS des années 1960* », précise-t-elle. Ils seraient plus de 200 en orbite terrestre. « *Comme pour tous les autres objets expédiés dans l'espace, nous essayons de comprendre comment ils évoluent et se détériorent* », poursuit Beth Laura O'Leary qui, à la lueur des dernières études attestant de la présence d'eau liquide sur la Lune, poursuit de nouvelles investigations : se pourrait-il que des poches de glace se soient formées à l'ombre des matériels laissés à la surface de la Lune et les aient fait rouiller ?

Certains vestiges ont une valeur très symbolique

« *Tous ces éléments sont des trésors archéologiques, certains ayant une histoire très symbolique.* » Ainsi de Vanguard 1, une sphère d'aluminium de 1,47 kg pour16 cm de diamètre. Lancé en 1958 par les États-Unis, dans le cadre d'un projet de l'US Naval Research Laboratory (NRL), il fonctionnait à l'énergie solaire et a permis de découvrir que la Terre était bosselée. Ou du satellite TRAAC (Transit Research and Attitude Control), lancé par l'US Navy pour mesurer les radiations émises par les essais nucléaires menés alors en haute altitude (400 kilomètres) dans le cadre du programme Starfish. « *Ce satellite a relayé les données sur les effets dévastateurs de l'essai Starfish Prime en 1962 qui a créé une ceinture de radiations autour de la Terre, désactivant à l'époque un tiers de tous les satellites en orbite ! TRAAC n'y a d'ailleurs pas résisté* », ajoute-t-elle. Ce vestige de la guerre froide va désormais orbiter au-dessus de nos têtes pendant des siècles.

Les domaines explorés par ces nouveaux archéologues sont très nombreux et concernent également les relations qu'entre-

NASA

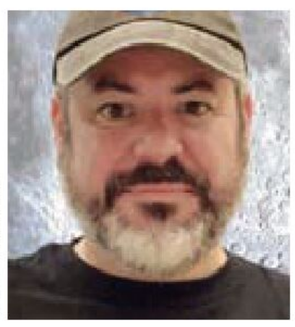
Skylab (1973). La première station orbitale, lancée par les Américains, a connu de nombreuses avaries. Elle a fini par chuter dans le sud-ouest de l'Australie en 1979, éparpillant sur Terre une multitude de débris.

SMITHSONIAN INSTITUTION

Les relations entretenues par les astronautes avec les technologies (ici une combinaison portée par John Glenn en 1962) font aussi l'objet d'études.

tiennent les humains avec ces matériels. « *Mes étudiants travaillent aussi bien sur l'histoire des chambres à coucher dans les stations spatiales que sur la perception par les riverains des bases de lancement comme cap Canaveral aux États-Unis ou Kourou en France* », explique Alice Gorman. En compagnie de Justin Walsh, de l'université Chapman, en Californie, elle étudie aussi les archives photo de la Station spatiale internationale (ISS) pour analyser de quelles façons l'équipage interagit avec les objets. « *Nous développons des algorithmes d'apprentissage automatique pour traiter de grandes quantités de données sur vingt ans d'occupation*, explique le chercheur. *L'idée est de trouver des modèles qui nous montrent comment les équipages sont censés utiliser les technologies mises à leur disposition et comment ils les adaptent à la microgravité qui règne dans la station.* » Une anthropologie de l'espace extra-atmosphérique sur laquelle travaille également Victor Buchli, de l'University College de Londres (Royaume-Uni), avec des financements du Conseil européen de la recherche. « *Depuis ces quatre-vingts dernières années de vols spatiaux, nous assistons à l'émergence d'une nouvelle culture et d'une nouvelle technologie. Il est essentiel de comprendre comment les humains créent, adaptent ou rejettent ces technologies* », explique l'expert.

Alice Gorman appelle de ses vœux une reconnaissance : « *Tout comme nous avons l'archéologie méditerranéenne, américaniste ou médiévale, il pourrait exister une archéologie planétaire*, explique celle qui souhaite aussi voir l'émergence de nouveaux traités internationaux. *Les accords Artemis de la Nasa, signés par huit pays en 2020, qui encadrent les bonnes pratiques de l'exploration spatiale, pourraient ainsi s'étendre à la préservation du patrimoine lunaire ou martien.* » « *Sur Terre, les archéologues rédigent des plans de gestion du patrimoine pour protéger les sites menacés par le développement : pourquoi ne pas le faire pour l'espace ?* », explique ainsi Justin Walsh. Les humains n'en sont qu'à la préhistoire de la conquête spatiale mais leurs empreintes sont déjà partout. ■



JUSTIN WALSH

« Sur Terre, les archéologues rédigent des plans de gestion du patrimoine pour protéger les sites, pourquoi ne pas le faire pour l'espace ? » **Justin Walsh**, université Chapman (États-Unis)

FRANÇOIS DESSET

Des inscriptions en élamite linéaire ont été gravées sur ce galet, attribué au souverain Puzur-Shushinak (2150-2100 avant J.-C.), et sur ce vase « gunagi » (1900-1880 avant J.-C.) mis au jour à Suse (Iran).

La Mésopotamie n'est plus le seul berceau de l'écriture

EXCLUSIF. La découverte en Iran d'une écriture vieille de plus de 4000 ans par l'archéologue français François Dresset révolutionne les connaissances sur les premiers écrits de l'humanité.

L'EXPLOIT EST EXTRAORDINAIRE, en raison du bouleversement qu'il induit. L'archéologue français François Desset, du laboratoire Archéorient-environnements et sociétés de l'Orient ancien (UMR 5133, CNRS/université Lyon-II) à Lyon, est parvenu à déchiffrer des inscriptions en élamite linéaire vieilles de 4400 ans ! Une annonce faite le 27 novembre, depuis le département des biens culturels de l'université de Padoue, en Italie. Ce système d'écriture était utilisé sur le plateau iranien dans l'ancien royaume d'Elam (actuel Iran) entre la fin du IIIe millénaire et le début du IIe millénaire avant notre ère. Fraîchement débarqué de l'université de Téhéran (Iran) où il enseigne depuis 2014, le chercheur a expliqué : *« Cette écriture avait été découverte pour la première fois sur le site de Suse (Iran) en 1901 et depuis 120 ans, nous n'étions pas parvenus à lire ce qui avait été inscrit il y a 4400 ans, faute d'avoir trouvé la clé. »* Surtout, ce déchiffrement fait voler en éclats l'idée que la Mésopotamie est le seul berceau de l'écriture !

Les plus anciens exemples d'écriture connus à ce jour, les tablettes protocunéiformes, proviennent en effet de Mésopotamie (Irak actuel) et remontent à l'âge du bronze, vers 3300 ans avant J.-C. Or voilà leur suprématie remise en question ! *« Nous découvrons que vers 2300 avant J.-C., un système d'écriture parallèle existait en Iran, et que sa version la plus ancienne — l'écriture proto-élamite (3300-2900 avant J.-C.) — remonte aussi loin que les premiers textes cunéiformes mésopotamiens,* précise François Desset. *Cela me permet d'affirmer aujourd'hui que l'écriture n'est pas d'abord née en Mésopotamie puis plus tard en Iran, mais que ces deux systèmes — le protocunéiforme mésopotamien et le protoélamite iranien — ont été contemporains. Il n'y a pas eu une écriture mère dont le protoélamite serait la fille, il y a eu deux écritures sœurs. Par ailleurs, en Iran, il n'y a pas eu non plus deux systèmes d'écritures indépendants comme les spécialistes le pensaient jusque-là, avec le protoélamite d'un côté et l'élamite linéaire de l'autre, mais une même écriture qui a été soumise à évolution historique et a été transcrite avec des variations au cours de deux périodes distinctes. »* Ce qui change complètement la perspective sur l'apparition de l'écriture au Proche-Orient et au Moyen-Orient. Puisque l'Iran a développé son propre système d'écriture en même temps que la Mésopotamie, le plateau iranien ne devrait plus être ignoré quand il s'agit de retracer les origines de l'écriture...

Un nouveau point de vue sur ce territoire

Pour François Desset, le « déclic » du déchiffrement s'est produit lors de l'analyse d'un corpus de 8 textes rédigés sur des vases en argent, des vases « gunagi », datés de vers 2000-1900 avant J.-C. Cette première étape a abouti au déchiffrement complet, qui sera publié scientifiquement en 2021. *« Jusqu'ici, tout ce qui concernait les populations occupant le plateau iranien provenait d'écrits mésopotamiens. Ces nouvelles découvertes vont enfin nous permettre d'accéder au propre point de vue des hommes et femmes occupant ce territoire. »* ■

Bernadette Arnaud @NarudaaArnaud

Le débat sur la bipédie de Toumaï relancé

Une nouvelle étude suggère que le « grand ancêtre de l'humanité », vieux de 7 millions d'années, serait plutôt apparenté aux singes quadrupèdes.

▸ 2002
Le crâne de Toumaï, exhumé au Tchad en 2001 par la mission du paléoanthropologue Michel Brunet, est publié dans *Nature*. Préhumain ou ancêtre de grands singes ? Une discussion s'ensuit.

▸ 2004
Un fémur est identifié par Aude Bergeret et l'anthropologue Roberto Macchiarelli parmi les ossements rapatriés avec le crâne à l'université de Poitiers.

▸ 2017
L'existence de ce fémur, pièce essentielle pour caractériser la bipédie, est révélée publiquement par Roberto Macchiarelli lors d'un colloque du CNRS.

▸ 2018.
Michel Brunet promet une publication sur le fémur.

▸ 2020
Un préarticle arguant que le fémur est celui d'un bipède est mis en ligne en septembre par l'équipe de Franck Guy à l'université de Poitiers. Il est toujours en cours de relecture scientifique.

▸ 2020
Une étude suggérant, à l'inverse de celle citée précédemment, que Toumaï était quadrupède est publiée dans le *Journal of Human Evolution.*

ALAIN BEAUVILAIN / SCIAV.FR/ LIEN DU BLOG : 3LZHPCB

L'analyse du fémur (ici à droite parmi les restes, dont le crâne, mis au jour au Tchad en 2001) suggère que Toumaï ne pouvait pas supporter la marche debout.

Après seize années dans l'ombre *(voir la chronologie ci-contre)*, un fossile crucial de Toumaï, réputé être le grand ancêtre de l'humanité, a été enfin décrit scientifiquement dans la revue *Journal of Human Evolution*. Stupeur ! l'étude de cet os de la cuisse suggère que *Sahelanthropus tchadensis*, vieux de 7 millions d'années, ne marchait pas sur deux jambes mais était plutôt apparenté aux singes quadrupèdes. Un choc qui retentit après une longue controverse autour du crâne, depuis sa découverte en 2001 par une mission franco-tchadienne dirigée par le paléoanthropologue Michel Brunet. L'article est signé par le paléoanthropologue Roberto Macchiarelli, du CNRS et du Muséum national d'histoire naturelle de Paris, ainsi que par son ancienne étudiante Aude Bergeret, les premiers à avoir repéré ce fémur parmi les restes rapatriés du Tchad et déposés à l'université de Poitiers.
Étonnés qu'une pièce aussi importante pour déterminer la bipédie n'ait jamais été étudiée ou publiée par les spécialistes de cette université, ils ont mené leur propre enquête, à partir de photos et d'une préanalyse effectuée à l'époque. *« Le degré de courbure de l'os, très arqué vers l'avant, est plutôt typique des chimpanzés »*, explique Roberto Macchiarelli, qui a travaillé avec le paléoanthropologue Bernard Wood *(lire ci-contre)* et le biomécanicien Damiano Marchi. Selon eux, l'angle entre le col et le corps du fémur, très ouvert, ne pourrait supporter la marche debout. Pour trancher, il faut attendre la publication de la morphologie de l'os interne par l'équipe rivale de Poitiers, celle de Franck Guy, toujours en cours de validation scientifique. ■

Rachel Mulot
@RachelFleaux

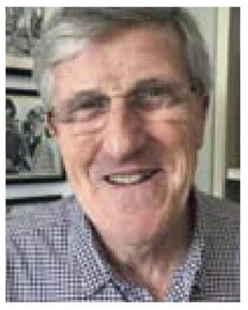
INTERVIEW

BERNARD WOOD

PALÉOANTHROPOLOGUE À L'UNIVERSITÉ COLUMBIAN DES ARTS ET DES SCIENCES, À WASHINGTON (ÉTATS-UNIS)

« DES PREUVES POTENTIELLEMENT EMBARRASSANTES »

« Quelle frustration de savoir qu'un os lié à la locomotion de Toumaï existe, mais que pour une raison quelconque, les chercheurs de l'université de Poitiers qui l'ont récupéré ont décidé de ne pas le partager avec la communauté scientifique. Ils ont le droit d'être les premiers à en publier l'étude, mais ce privilège s'accompagne de l'obligation de le faire en temps opportun. Or seize ans ont passé ! Au final, l'article que je viens de cosigner sur le fémur de *Sahelanthropus tchadensis* est le premier à être scientifiquement validé.
Et les arguments qu'il apporte contre la bipédie de Toumaï sont potentiellement embarrassants pour en faire un "ancêtre de l'humanité". Toutefois, nos observations sont préliminaires, nous n'avons eu qu'un accès limité et bref au fossile. Nous espérons que les responsables de la conservation du spécimen original mèneront une étude comparative plus détaillée et approfondie. »



La Recherche

« L'histoire de la domestication est une histoire de domination »

Dans un ouvrage très documenté, l'historienne des sciences Valérie Chansigaud explique comment l'humain a sélectionné les animaux afin qu'ils puissent supporter un cadre de vie artificiel.

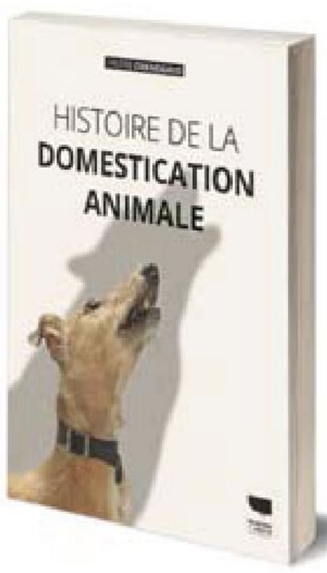
AGNÈS HAUCK

Valérie Chansigaud, historienne des sciences et de l'environnement, étudie l'impact de l'être humain sur son environnement. Elle s'intéresse particulièrement aux relations qui relient les questions sociales aux problèmes environnementaux, comme les inégalités ou les préjugés culturels. Chez Delachaux et Niestlé elle est aussi l'auteure de *La Nature à l'épreuve de l'homme* (2015).

« Le mot domestication est un piège. Familier, il nous donne l'impression qu'on en maîtrise le sens, mais tenter d'en apporter une définition s'avère bien plus complexe. La domestication repose sur deux piliers : un mécanisme héréditaire et une intentionnalité. L'humain cherche à transformer des espèces sauvages en quelque chose de nouveau — des "espèces" domestiques — par le biais d'une sélection artificielle pratiquée de façon intentionnelle. Il faut mettre le mot "espèces" entre guillemets, car le terme est ambigu. L'objectif étant qu'elles soient dotées de caractères biologiques, comportementaux et physiologiques particuliers, qui deviendront héréditaires par le fait même de cette sélection. Cela répond donc à des exigences purement humaines : l'histoire tout entière de la domestication est une histoire de domination. Car son but n'est pas d'améliorer la qualité de vie de ces animaux mais leur capacité à tolérer un cadre de vie artificiel. Prenons l'exemple du cochon d'Inde. Chez ses ancêtres, les mâles n'auraient jamais accepté de partager la même cage ! Seule la sélection a permis une transformation comportementale afin qu'il supporte les conditions d'élevage. On l'a rendu juste moins agressif et plus indifférent aux situations de stress : par la domestication, nous avons rendu les animaux compatibles avec nos modes de vie et nos besoins.

Pour revenir à l'intentionnalité, plus l'on remonte dans le temps, plus cette notion se brouille. Elle est ainsi très claire concernant les domestications contemporaines : on sélectionne des animaux pour en faire des spécimens d'élevage — pour la pisciculture par exemple — ou de laboratoire. Mais c'est beaucoup plus flou pour le loup par exemple, dont le cas est emblématique. Celui-ci a été la première espèce domestiquée voilà 19 000 à 15 000 ans. Les peuples préhistoriques qui y étaient confrontés ont entrepris des sélections sans vraiment savoir — puisqu'ils n'avaient pas lu Charles Darwin ! — qu'ils allaient créer quelque chose de différent qui serait le chien. Mais la sélection ayant reposé sur le choix des individus les plus dociles, l'intentionnalité peut être retenue. Il est fascinant de penser que cette histoire s'est forcément déroulée par tâtonnements avec une quantité presque infinie d'essais, d'échecs, de répétitions mis en œuvre par des populations très variées sur une échelle temporelle et géographique extrêmement large. Il n'y a pas eu de « moment Eurêka ! »

Dans ce champ de recherche, tout est d'ailleurs nuances et contradictions. Ainsi, il n'existe pas de véritable nomenclature des espèces domestiquées ou non : cela dépend de l'appréciation des chercheurs et des outils employés. Si la classification est claire pour le chien, les grands herbi-



EXTRAIT

La domestication animale appartient bien plus à la culture qu'à la biologie. Elle n'est pas apparue dans toutes les sociétés et de nombreuses collectivités n'ont jamais connu d'animaux domestiques : ce mécanisme nécessite non seulement de disposer d'animaux domesticables mais également de posséder les conditions sociales permettant son émergence. La sélection artificielle n'a pas seulement modifié les espèces animales ou influé sur les individus qui y étaient soumis, elle a profondément modifié les structures sociales : les guerres, les voyages, la situation des femmes, les hiérarchies sociales, l'esclavage, le rôle de l'éthique au sein des sociétés, la propriété, les croyances, il n'y a pas un domaine des cultures qui n'ait été affecté par la domestication.

Histoire de la domestication animale, Valérie Chansigaud, Delachaux et Niestlé, 400 p., 24,50 €

GEORGES BARTOLI / DIVERGENCE

Le chien a été la première espèce domestiquée par l'homme afin de la mettre à son service, (ici, la protection des brebis contre le loup).

vores (cheval, mouton, chèvre) ou le ver à soie, elle l'est moins pour le chat. À son égard, il y a eu clairement une sélection. Mais a-t-elle été toujours intentionnelle ? Le doute persiste, car si le chat a trouvé sa place parmi nous, c'est surtout grâce à ses talents de chasseur de souris qu'il conserve au point d'être encore capable de survivre dans la nature à l'égal de son ancêtre sauvage. Malgré cela, il manifeste un comportement juvénile commun à toutes les espèces domestiquées (néoténie) : il aime jouer tout au long de sa vie. Le chat est donc bien entre deux mondes.

> « La domestication a engendré un appauvrissement de la biodiversité sauvage »

La domestication d'espèces animales et végétales de plus en plus variées n'a fait que croître au fur et à mesure de l'évolution des besoins et des motivations des humains au sein des premières organisations sociales agricoles. Ma thèse est qu'elle a engendré deux transformations radicales. D'une part, un bouleversement des écosystèmes et l'appauvrissement progressif de la biodiversité sauvage. D'autre part, une profonde modification des structures sociales avec l'émergence de sociétés de plus en plus hiérarchisées, exploitant de façon drastique l'environnement et imposant une situation en général plus dégradée pour les femmes. Ce qui ne fait que perdurer. » ■ **Propos recueillis par Andreina De Bei**

SUR LE MÊME THÈME

Compagnon de longue date

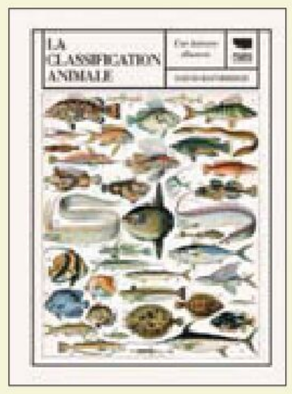
OMNIVORE Si on ne veut pas s'en tenir au *« tout est bon dans le cochon »*, sur 4 pages avec dessin des « différents morceaux », on peut se délecter des 410 autres du *Cochons* d'Erik Orsenna. Aussi virevoltantes qu'une queue en tire-bouchon, elles ne sont pas seulement un éloge de l'animal *« qui nous est le plus proche »*. L'ambassadeur de l'Institut Pasteur fait étonnamment naviguer son lecteur, tel un compagnon d'Ulysse transformé en pourceau par Circé la magicienne. De l'assassin en 1131 d'un futur roi de France aux 32 cochons morts en 2019 mais avec retour d'activité synaptique, il passe par les 460 millions de porcs chinois ou les 14 000 exploitations bretonnes, avec hommage aux élevages méthanisés. Educatif. ■ **D. J. L.**

Cochons. Voyage aux pays du Vivant, Erik Orsenna, Fayard-Stock, 414 p., 22 €

Idole à cornes

BESTIAIRE Le premier dieu ? Après l'ours, le cochon, et le loup, Michel Pastoureau, célèbre médiéviste, revisite l'histoire du taureau, domestiqué au néolithique il y a près de 10 000 ans. L'auteur revient sur l'existence de cet animal puissant et impétueux, depuis les fresques des parois de Lascaux, où il est représenté à l'état sauvage il y a 17 000 ans, jusqu'au bestiaire du monde actuel, en passant par les mythologies taurines les plus anciennes. Si son culte est attesté dès la plus haute antiquité au Proche-Orient, c'est en Crète que se développera une véritable taurolâtrie, avant que le culte de Mithra ne pénètre le monde romain. Le christianisme le diabolisera. ■ **B. A.**

Le Taureau, Michel Pastoureau, Seuil, 160 p., 19,90 €

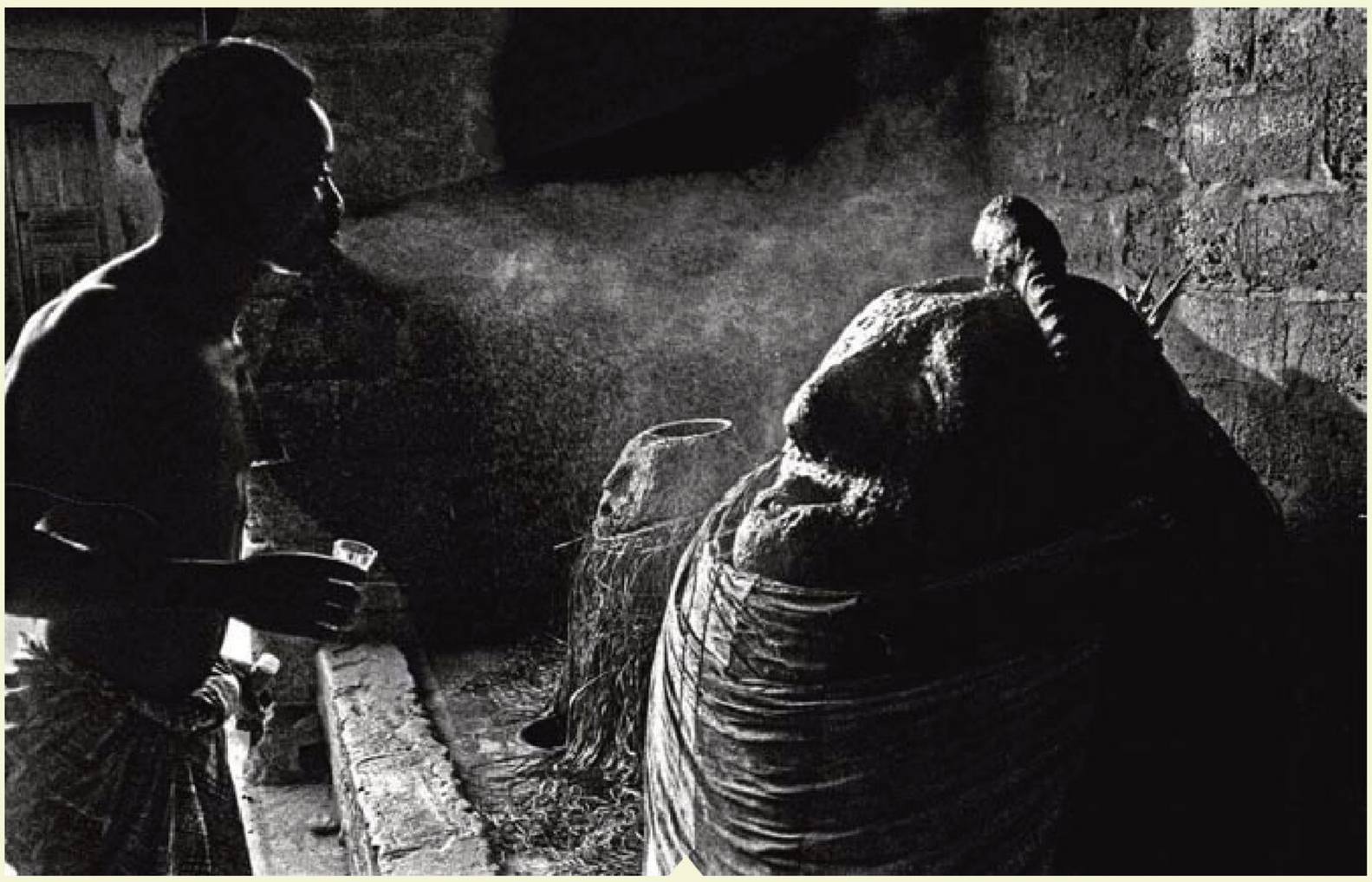


L'univers animal en images

TAXONOMIE Dessine-moi un caïman à lunettes, une mante-feuille, un loup-marsupial… Défi relevé par cet éclatant ouvrage qui propose une classification chronologique des animaux tout en dessins, peintures et graphiques. Aux arches de Noé et aux bestiaires enluminés du Moyen Âge succèdent les planches descriptives des XVIIIe et XIXe siècles, forgées à partir de l'émergence du concept d'évolution. Les plus récentes représentations conçues par ordinateur d'un génome de virus assoient le propos : cette iconographie foisonnante témoigne à la fois des partis pris artistiques, du regard que l'on a porté sur l'animal, et des avancées scientifiques. ■ **A. De B.**

La Classification animale. Une histoire illustrée, David Bainbridge, traduction Denis Richard, Delachaux et Niestlé, 256 p., 24,90 €

C'EST À LIRE



CATHERINE DE CLIPPEL

L'assistant d'un prêtre vaporise de l'alcool de palme sur le vaudou Djagli à Séko, au Togo, en 1989.

Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur le vaudou

Le célèbre médecin légiste et anthropologue Philippe Charlier invite le lecteur à découvrir sa cérémonie d'initiation, à Abomey, au Bénin.

DIVINATION Où l'on découvre que Philippe Charlier est un initié du vaudou. Le médiatique médecin légiste — connu pour faire parler les restes de grands disparus tels Richard Cœur de Lion, Descartes ou Diane de Poitiers —, aujourd'hui directeur du département de la recherche et de l'enseignement au musée du Quai-Branly, à Paris, est aussi anthropologue. Pendant de nombreuses années, il s'est rendu à Abomey au Bénin, en Afrique de l'Ouest. Là, il a été introduit à cette religion transmise par des générations d'ancêtres, selon laquelle quand « le corps meurt, l'esprit continue de vivre ». Comme dans un livre d'aventures, sur un ton de reportage, voire de thriller avec voix d'outre-tombe, les premières pages de cet ouvrage paru dans la prestigieuse collection « Terre Humaine » invitent à découvrir la cérémonie d'initiation de l'auteur. Et ce, sans obligation de secret, Philippe Charlier citant à cette occasion le célèbre ouvrage *Dieux d'Afrique* (1954) de l'ethnologue Pierre Verger : *« Une initiation ne comporte pas principalement, contrairement à l'idée que les gens s'en font, la révélation solennelle au novice d'un secret, accompagnée de menaces pour assurer son silence sur des traditions ésotériques qu'il est appelé à perpétuer. »* Aussi peut-on suivre les séances avec devin (le *bokonon*) et autres dignitaires, qui feront découvrir au nouvel initié sa divinité tutélaire. Ici Zakpata, « le maître de la Terre ». En 37 courts chapitres, le lecteur s'initiera plus largement, lui, aux symboles, fétiches, revenants (les *egungun*), à l'importance des rois d'Abomey dont les palais étaient aussi des lieux de culte… 16 pages sont dévolues à des photos noir et blanc avérant l'actualité du vaudou. Pour les passionnés de cette tradition fascinante, on ne saurait trop conseiller les 80 photos d'un autre ouvrage, par la photographe-réalisatrice Catherine De Clippel. Danseuses en transe, masques spectaculaires, autels protecteurs… sont ici magnifiés. ■ **Dominique Leglu**

Vaudou. L'homme, la nature et les dieux, Philippe Charlier, coll. « Terre Humaine », Plon, 350 p., 23,90 €

Photographier les vodous. Togo-Bénin, 1988-2019, Catherine de Clippel, Fondation Maison des sciences de l'homme, 144 p., 39,50 €

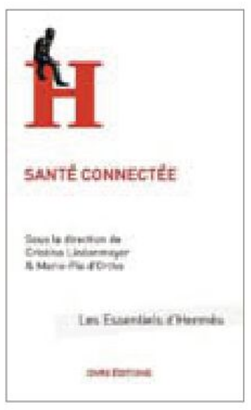
Mars attendra

COLONISATION À l'heure où Elon Musk teste Starship, son vaisseau spatial destiné à la colonisation martienne, cet ouvrage écrit par une astrophysicienne remet scientifiquement les pendules à l'heure. La promiscuité dans l'espace clos d'un vaisseau pendant six mois sera bien plus difficile à supporter au plan psychologique que nos semaines de confinement. Les colons qui arriveront sur Mars seront diminués physiquement. Ils devront vivre dans un environnement hostile où la moindre erreur sera fatale. Quant à « terraformer » Mars… : il a fallu 4,57 milliards d'années pour que notre planète devienne celle qu'elle est aujourd'hui. ■ **S. R.**

Nous ne vivrons pas sur Mars, ni ailleurs, Sylvie Ekström, Javier Nombela, Favre, 224 p., 19 €

Questions autour de la santé connectée

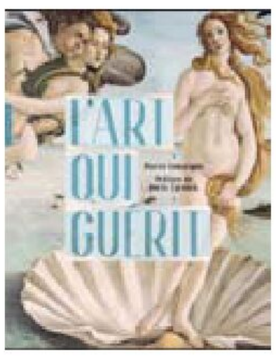
ENJEU Un tournant a été amorcé depuis que les objets connectés ont investi le champ de la santé. Et ce que cet ouvrage collectif montre bien, c'est qu'on été renouvelées, avec plus de force, des problématiques déjà bien connues. Entre autres : comment assurer la confidentialité des données personnelles ? Comment, aussi, faire en sorte que cette connexion permanente ne devienne pas néfaste pour l'utilisateur ? Car ces questions, loin d'être anodines quand il s'agit d'enregistrer son nombre de pas journalier, le sont encore moins quand on parle, par exemple, de patients suivis pour des pathologies chroniques. ■ **V. G.**



Santé connectée, Cristina Lindenmeyer et Marie-Pia d'Ortho (dir.), CNRS éditions, 216 p., 10 €

L'art aux petits soins

THÉRAPEUTIQUE *« Sans art, les choses ne seraient pas ce qu'elles sont »*, écrit Boris Cyrulnik. En

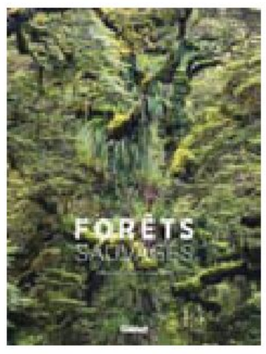


inventant une production artistique, l'homme s'est rendu capable de triompher de l'angoisse du rien. Le neuro-psychiatre et son coauteur le neurologue Pierre Lemarquis rappellent, à travers la visite d'une exposition imaginaire, combien les arts procurent une sensation de bien-être et sont reconnus pour leur intérêt thérapeutique. En convoquant comme soignants Michel Ange, Frida Kahlo, Picasso et bien d'autres, c'est une expérience de l'art guérisseur qui est partagée. Une initiative que l'OMS souhaite voir se multiplier à travers des projets associant médecine et arts. ■ **B. A.**

L'art qui guérit, Pierre Lemarquis, Boris Cyrulnik, Hazan, 192 p., 25 €

Indispensables arbres

ÉCOLOGIE Les forêts primaires, où la main de l'homme n'est pas ou peu intervenue, ont été massivement détruites au cours des dernières décennies. Dans l'hémisphère Nord, elles sont réduites à l'état de confettis. Depuis quelques années cependant, émerge l'idée de les protéger, voire d'en recréer comme le préconise l'association Francis Hallé. Mais de tels espaces sauvages



et inaccessibles ne font pas l'unanimité. Pour plaider en leur faveur, Annik Schnitzler, écologue à l'université de Lorraine, en explique le fonctionnement et la nécessité à l'échelle planétaire. Surtout, les nombreuses et superbes photos naturalistes nous donnent à voir leurs merveilles et leur diversité. ■ **S. R.**

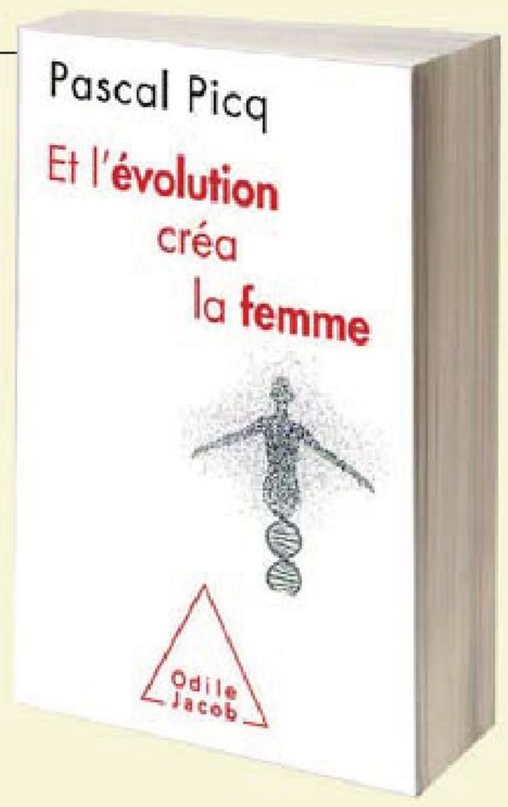
Forêts sauvages, Annik Schnitzler, Glénat, 192 p., 39,50 €

Albert sans Einstein

BD Alerte ! Quelqu'un a volé l'organe cérébral du célèbre professeur Albert ! S'inspirant d'un fait divers authentique

(la subtilisation du cerveau d'Einstein par son légiste en 1955), le récit s'en détache très vite joyeusement pour prendre les chemins de traverse et se transformer en une cavalcade poético-fantastique. L'une des grandes idées de l'histoire est que parmi les fugitifs se trouve le professeur lui-même, revenu d'entre les morts, certes sans son cerveau, mais pas diminué pour autant et acteur majeur de cette course folle. Dessins dynamiques, découpage enlevé, cette « fuite du cerveau » offrira sans nul doute un plaisir jouissif à l'organe situé juste derrière vos deux yeux. ■ **H. R.**

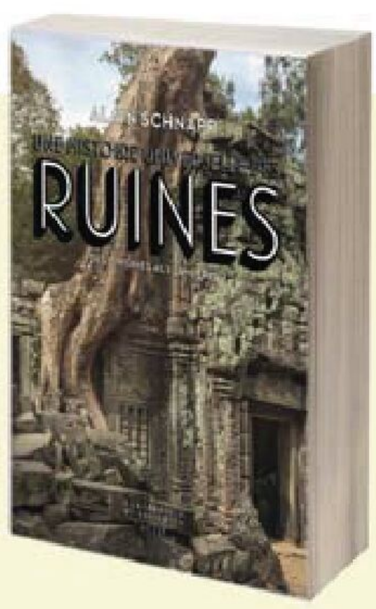
La Fuite du cerveau, Pierre-Henry Gomont, Dargaud, 192 p., 25 €



Coercition sexuelle

ÉVOLUTION Françoise Héritier écrivait en 2012 que l'espèce humaine est *« la seule dont les mâles tuent massivement les femelles »* (*lire* S. et A. *hors série n° 169*). Pascal Picq, paléoanthropologue au Collège de France, éclaire aujourd'hui cette sentence en détaillant les violences intersexuelles chez les singes à queue comme chez nos plus proches parents, bonobos ou chimpanzés. *« Nos points communs avec ces espèces ne sont pas seulement biologiques et concernent également les comportements, la vie sociale, et jusqu'aux rapports entre les sexes »*, explique-t-il en explorant les sociétés animales plus ou moins « monogames » ou celles dotées de « harem ». Il dresse un tableau comparatif des divers modes de coercition sexuelle, directe ou indirecte, pré ou post-copulatoire chez sept espèces de singes « patrilocales » (dont le mâle vit avec le groupe) organisées autour de mâles apparentés. Il est accablant pour les *Homo sapiens*. L'auteur donne enfin des pistes pour infléchir ces massacres culturellement ancrés. ■ **Rachel Mulot**

Et l'évolution créa la femme
Pascal Picq, Odile Jacob, 462 p., 22,90 €



Des ruines et des hommes

CIVILISATION *« Tous les hommes ont un secret attrait pour les ruines »*, écrit Chateaubriand dans le *Génie du christianisme*. Dans un ouvrage de poids, où la densité de la réflexion le dispute à l'érudition, l'archéologue et historien Alain Schnapp, fondateur de l'Institut national d'histoire de l'art (Inah), interroge à son tour les ruines. Ou plutôt les pense. Car pour l'auteur, penser les ruines, c'est penser les hommes autant que les civilisations. Des ruines du monde occidental à celles des civilisations précolombiennes ou arabo-musulmanes ; du Moyen Âge occidental à l'Extrême-Orient, ce beau livre, fruit de quinze années de réflexion est l'œuvre d'une vie. Pourquoi les ruines exercent-elles une telle attraction sur nous ? Parce qu'il n'existe pas plus d'hommes sans mémoire que de société sans ruines. Ainsi la vue du temple du *Ta Prohm*, à Angkor, au Cambodge, choisi en couverture, illustre par la masse des arbres qui le dévore, les liens indissolubles existant entre la nature et les œuvres des hommes, et donc la nature et la culture. S'il n'y a pas de définition unique de ce qu'est une ruine, Alain Schnapp s'emploie à nous faire découvrir combien les ruines n'existent que par le regard qu'on leur porte. ■ **Bernadette Arnaud**

Une histoire universelle des ruines. Des origines aux Lumières,
Alain Schnapp, Seuil, 711 p., 49 €

Un lièvre dans son écrin

JEU DE PISTE Animal emblématique des sommets alpins, le lièvre variable (*Lepus timidus*) est pourtant très difficile à observer. Il a fallu des années de jeu de piste dans la neige au photographe Olivier Born pour capter ces images inédites des « blanchons » du parc des Écrins. Son pelage blanc sur blanc en hiver et marron sur marron en été est un exemple des nombreuses prouesses d'adaptation physiologiques de cet animal rescapé du dernier âge glaciaire, dont l'évolution raconte indirectement l'histoire du climat. Enrichi des textes de Michel Bouche, spécialiste de ce mammifère au parc national des Écrins, cet ouvrage nous donne aussi à voir une nature et une faune exceptionnelles. Une traque d'une grande délicatesse. ■ **S. R.**

Le Lièvre invisible, Olivier Born et Michel Bouche, Salamandre, 160 p., 34 €

C'EST À VOIR

Musée Granet

Musée de Préhistoire

Muséum de Toulouse

Musée de la Poste

Citéco

Pour le second confinement, plusieurs lieux de sciences proposent de nouvelles visites et écoutes à distance. En voici une sélection qui vient enrichir notre guide des expositions virtuelles que vous pouvez retrouver ici : **sciav.fr/guideexposvirtuelles**

EXPOSITIONS VIRTUELLES

#LaScienceEstLà

Dans le cadre du programme #CultureChezNous du ministère de la Culture, la Cité des sciences a réactivé son dispositif #LaScienceEstLà. On y trouve des démonstrations et des quiz réalisés par les médiateurs de la Cité et du palais de la Découverte, plus de 600 conférences filmées dont une avec l'architecte du viaduc de Millau, Michel Virlogeux, ainsi qu'un programme d'activités pour les 3-8 ans.
sciav.fr/887Cite

Folklore

À défaut de pouvoir découvrir la nouvelle exposition du Mucem consacrée au folklore, conçue avec le centre Pompidou-Metz, une présentation de l'exposition avec les commissaires expliquant la démarche qui a guidé la sélection des 360 œuvres présentées.
sciav.fr/887Folklore

Le musée d'Archéologie nationale chez vous

Le musée d'Archéologie nationale se visite à distance grâce à des vidéos des collections numérisées en trois dimensions, présentées soit chronologiquement, soit géographiquement, avec un objet mis en avant chaque mois.
sciav.fr/887Archeologie

À la découverte de l'Égypte antique

Visitez l'exposition « Pharaon, Osiris et la momie » qui présente l'intégralité du fonds égyptien du musée Granet *(lire* S. et A. *n° 885)* avec le conservateur en chef du musée Granet, Bruno Ély.
sciav.fr/887Egypte

Rêver l'Univers

La nouvelle exposition temporaire du musée de la Poste se parcourt dans une visite virtuelle de 20 minutes guidée par Céline Neveux, commissaire de l'exposition, et ponctuée des interventions de cinq des artistes exposants.
sciav.fr/887Univers

Le musée de Préhistoire d'Île-de-France à distance

Situé à Nemours, le musée de Préhistoire d'Île-de-France se visite virtuellement, aussi bien pour ce qui est des collections permanentes que pour l'exposition temporaire actuelle, consacrée à un peuple gaulois méconnu, les Sénons.
sciav.fr/887Prehistoire

Visite privée du muséum de Toulouse

Le directeur du muséum, Francis Duranthon, propose une visite des collections en vidéo, que l'on pourra compléter par une trentaine de conférences mises en ligne.
sciav.fr/887Museum

Planetarium@home

Le planétarium de Vaulx-en-Velin invite à des rencontres hebdomadaires interactives avec des astronomes qui présentent leurs recherches et à des vidéos explicatives des médiateurs qui répondent aux questions le plus souvent posées par les visiteurs.
sciav.fr/887Planetarium

Largo Winch et l'économie

Citéco, la cité de l'économie à Paris, enrichit son offre de contenus disponibles en ligne sous forme d'une conférence avec le commissaire de l'exposition « Largo Winch, aventurier de l'économie », des podcasts consacrés à des concepts économiques explorés au travers d'œuvres populaires et de nouveaux jeux en ligne.
sciav.fr/887Citeco

Les galeries virtuelles de la BNF

Au-delà des milliers de livres disponibles gratuitement en téléchargement et des conférences à écouter, la Bibliothèque nationale de France, à Paris, propose de revivre virtuellement ses grandes expositions comme celle dédiée à la *fantasy* ou les diverses explorations de l'histoire de la cartographie.
sciav.fr/887BNF

Le muséum autrement...

Le muséum de Nantes maintient une activité culturelle et scientifique sur son site : visites virtuelles en vidéo, conférences à réécouter mais aussi des jeux à faire en famille (puzzles, origamis) et des vidéos pour découvrir notamment différentes araignées.
sciav.fr/887Nantes

À ÉCOUTER

Sixième Science

Déjà 40 épisodes de podcast Sixième Science sont disponibles ! Ce programme de vulgarisation scientifique réalisé tous les mois par *Sciences et Avenir* et *20 Minutes* et interroge un journaliste de l'équipe de notre mensuel sur des thèmes variés, du cerveau aux ondes gravitationnelles, en passant par le réchauffement climatique.
sciav.fr/887Science

Le grand orchestre des animaux

Une installation du musicien et bioacousticien américain Bernie Krause conçue pour la Fondation Cartier à Paris et adaptée en ligne. Dédiée aux bruits de la planète, elle a été réalisée à partir de près de 5000 heures d'enregistrements dans des habitats naturels peuplés par près de 15 000 espèces animales.
sciav.fr/887Orchestre

LE CIEL DE JANVIER

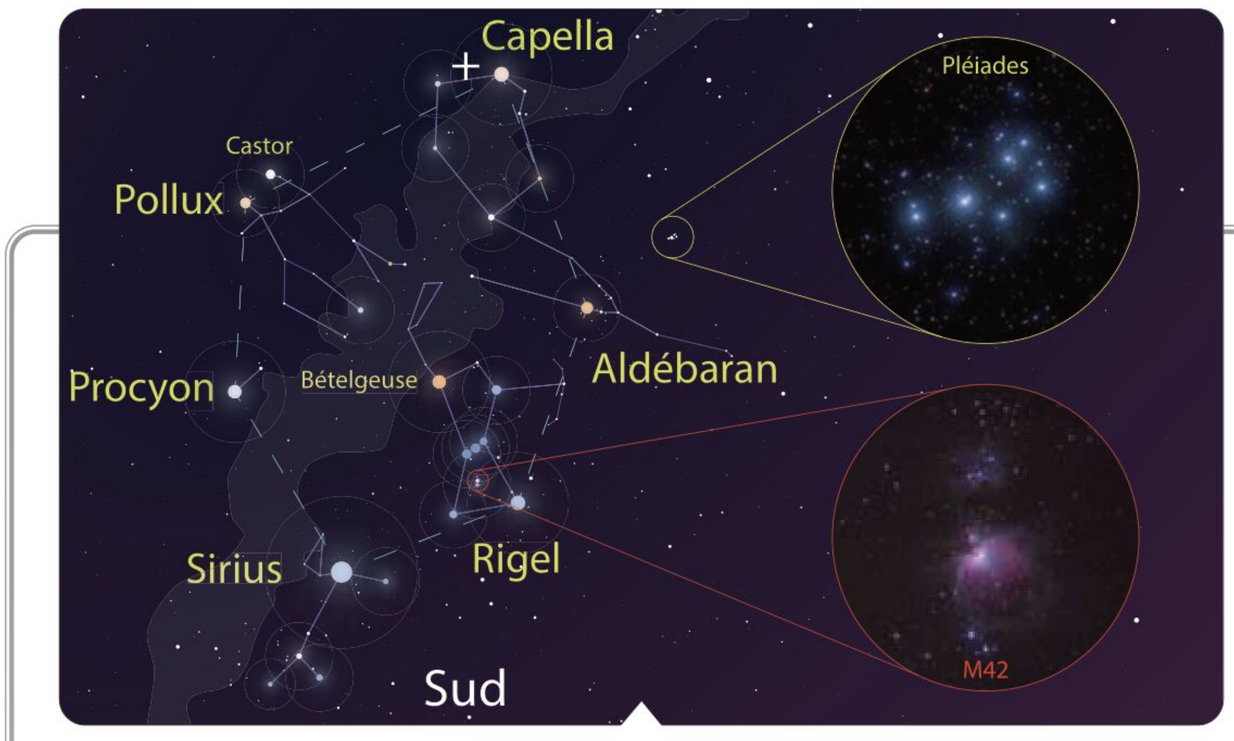
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE
La petite planète atteint sa plus grande distance angulaire (près de 19°) à l'est du Soleil le 24. Elle bénéficie d'un écliptique assez relevé et devient aisément observable en début de soirée à partir du milieu du mois.

VÉNUS
L'étincelante étoile du Berger n'est plus visible que marginalement, au petit matin, en début de mois. Son lever précède celui du Soleil de 1h30 le 1er mais seulement de… 30 min 30 jours plus tard.

MARS
La planète Rouge se trouve encore dans de bonnes conditions d'observation. Elle est visible dès la tombée de la nuit à une bonne cinquantaine de degrés de hauteur dans la direction du sud et se couche vers 2 h. Elle quitte les Poissons le 5 pour entrer dans le Bélier. S'éloignant rapidement de la Terre, Mars perd près de la moitié de son éclat au cours du mois.



L'astérisme domine toute la partie sud du ciel vers 23 h en janvier. La croix blanche en haut de l'image symbolise le zénith.

L'hexagone d'hiver

VISIBLE TOUTES LES NUITS de cette saison, l'hexagone d'hiver, moins connu que le triangle de l'été, est pourtant plus spectaculaire. Il est formé des étoiles Capella (constellation du Cocher), Aldébaran (Taureau), Rigel (Orion), Sirius (Grand Chien), Procyon (Petit Chien) et Pollux (Gémeaux). En son cœur, se trouve une étoile orangée, Bételgeuse (Orion).

Notre conseil Immanquable par sa taille et l'éclat des étoiles qui le constituent, l'hexagone d'hiver regorge d'objets du ciel profond. Aux jumelles, la région de formation stellaire M42 (la nébuleuse d'Orion) apparaît sous la forme d'une tache cotonneuse et les Pléiades, un amas d'étoiles, resplendissent.

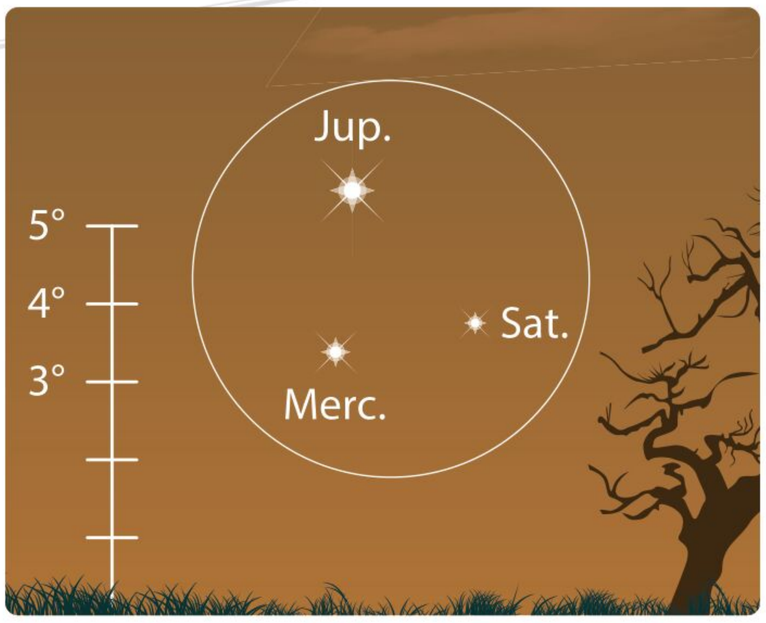
Retrouvez la carte du ciel sur sciav.fr

JUPITER
La plus massive des planètes n'est plus visible qu'en début de mois en soirée avant d'être engloutie par l'éclat du Soleil. Elle passe d'ailleurs en conjonction avec l'astre du jour le 29.

SATURNE
La planète aux anneaux n'est pratiquement pas visible en janvier car très proche de la direction du Soleil. Elle passe en conjonction avec notre étoile le 24. Comme Jupiter, nous retrouverons Saturne en fin de nuit à la sortie de l'hiver.

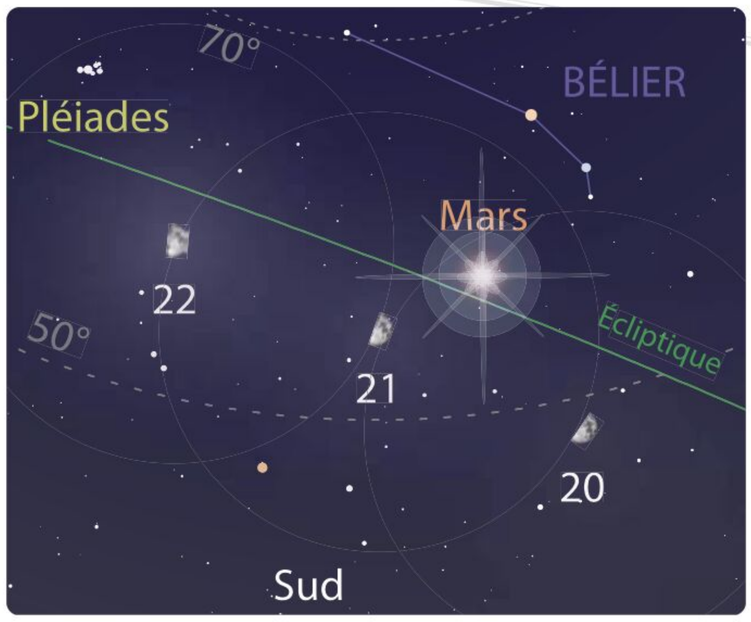
L'appli du mois

DSO PLANNER FREE est une application gratuite en anglais pour Android. Prisé des amateurs, c'est un outil de cartographie céleste et de planification des observations. Cette version s'appuie sur une base de données de 9000 étoiles et 220 objets du ciel profond. Pour aller plus loin, il vous faudra acquérir une des versions payantes.



LE 10, 30 MINUTES APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, vous pouvez tenter une observation difficile aux jumelles des planètes Jupiter, Mercure et Saturne, très bas vers le couchant.

45 MINUTES APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL. Si vous disposez d'un horizon dégagé, Mercure sera facilement accessible vers l'ouest-sud-ouest en seconde quinzaine.



DU 20 AU 22, LA LUNE REND VISITE À MARS et le 21, notre satellite s'en trouve à 6° 1/2, dans la constellation du Bélier. En soirée, les deux astres dominent largement l'horizon sud.

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ENTOMOLOGIE

Les insectes entendent-ils ?

Émilie A.

Lorsqu'ils sont apparus il y a 400 millions d'années, les insectes étaient sourds. Puis certains ont acquis la capacité d'entendre. Aujourd'hui, sur les 30 ordres majeurs d'insectes, neuf incluent des espèces dotées de l'ouïe. L'organe dédié à la perception du son peut se trouver sur différentes parties de leur anatomie. Ainsi, les drosophiles et les moustiques ont des oreilles sur les antennes, les grillons et les sauterelles sur les pattes antérieures, les névroptères sur les ailes et les cigales et criquets sur l'abdomen. Et l'ouïe la plus fine du monde est l'apanage d'un insecte : *Ormia ochracea*, une minuscule mouche. Cette sensibilité lui sert à repérer les criquets mâles dans lesquels elle pond ses œufs afin que les larves se nourrissent de leurs organes. ■
Anne-Sophie Tassart @TassartAS

BIODIVERSITÉ

Si l'humain n'était pas là, à quoi ressemblerait la Terre ?

Salomé O.

Si l'humanité n'existait pas, la biodiversité serait bien plus importante, selon une étude danoise publiée en 2015. Le paysage sous nos latitudes ressemblerait à celui du... Serengeti, un parc national de Tanzanie. Avec des mammifères géants tels des éléphants et des rhinocéros gambadant librement dans les plaines ! Car si l'on trouve encore autant de gros animaux en Afrique, c'est parce qu'ils n'ont pas été encore éliminés par les activités humaines. La biodiversité d'une zone géographique serait directement liée à son urbanisation. Aussi les régions montagneuses demeurent-elles, dans une certaine mesure, préservées. ■ **A. S. T.**

WALTRAUD GRUBITZSCH/DPA/ZUMA PRESS/REA

L'ex-RDA dispose aujourd'hui d'infrastructures médicales de pointe (ici, à Leipzig).

SANTÉ PUBLIQUE

Allemagne : l'espérance de vie à l'Est a-t-elle rattrapé son retard sur l'Ouest ?

Albane T.

Au moment de la réunification, en 1990, l'écart d'espérance de vie entre l'Allemagne de l'Ouest et celle l'Est était de 3,4 ans pour les hommes et de 2,8 ans pour les femmes. Cet écart avait commencé à se créer au milieu des années 1970, la mortalité liée aux maladies cardio-vasculaires et aux accidents vasculaires cérébraux (AVC) baissant plus vite à l'Ouest qu'à l'Est où les techniques médicales les plus modernes (médicaments, unités d'intervention d'urgence, chirurgie cardiaque non invasive, etc.) n'étaient pas disponibles. La réunification a d'abord eu un impact négatif. « *La chute du régime communiste a brusquement désorganisé les règles de la vie sociale libérant certains comportements dangereux pour la santé (alcoolisme, conduite imprudente sur la route, etc.) dont le développement a aussi été une réponse au stress du passage à l'économie de marché* », expliquaient en 2017 des chercheurs de l'Institut national d'études démographiques (Ined) français dans la revue *Population et Sociétés*. Mais ensuite, le rattrapage a été spectaculaire avec l'accès aux techniques modernes. En 2013, la différence n'était plus que de 1,3 an chez les hommes et avait presque disparu chez les femmes (0,17 an). Le retard n'est toujours pas totalement comblé, non pas du fait du système de santé, mais en raison des comportements. Les ex-Allemands de l'Est « *continuent de pâtir d'un reliquat de sur-risques liés aux déficiences de l'ancien régime en matière de maladies cardio-vasculaires et de maladies de société (alcoolisme, tabagisme, morts violentes, comportements propices aux maladies du cœur)* », concluaient les chercheurs de l'Ined. ■ **Lise Loumé** @lysLoume

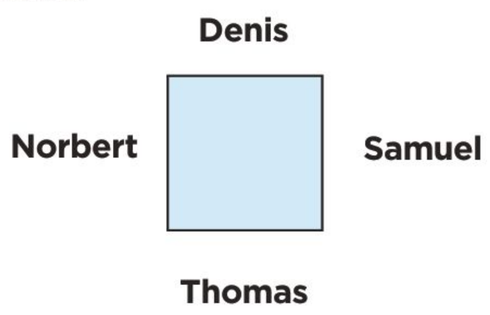
Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 886, Décembre 2020

Un dîner très topologique

Faisons un tableau avec les amis et les métiers :

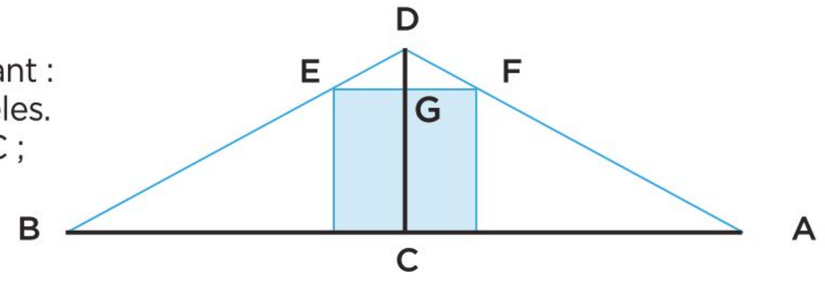
	Notaire	Entrepreneur	Bouquiniste	Musicien
Denis	OUI	X	X	X
Norbert	X	OUI	X	X
Thomas	X	X		
Samuel	X	X		

Puisque nous savons que Denis est notaire, mettons en noir un oui dans la case appropriée et des croix dans les cases fausses. La proposition 1 nous permet de placer Norbert à côté de Denis et la proposition 3, Samuel en face de lui. Thomas occupe donc la place restante. La proposition 2 nous indique que Norbert est l'entrepreneur. Nous pouvons compléter le tableau (en rouge). En 3, nous apprenons que Samuel n'est pas le bouquiniste, il est donc musicien, et c'est Thomas le bouquiniste.



Robot et robot

Le rapport des distances parcourues par les robots pendant le même temps est constant : k = CD/AB. Les triangles DEF et DBA sont semblables, ayant leurs grands côtés parallèles. On a : CD/AB = DG/EF = DG/40 = k. Quand R2 parcourt CD + DG, R1 parcourt AB + BC ; et quand R2 parcourt CG soit 40 m, R1 parcourt CA soit 100 m et k = 40/100. DG/40 = 40/100 donc DG = 16 et CD = 16 + 40 = 56 m.



Séries improbables

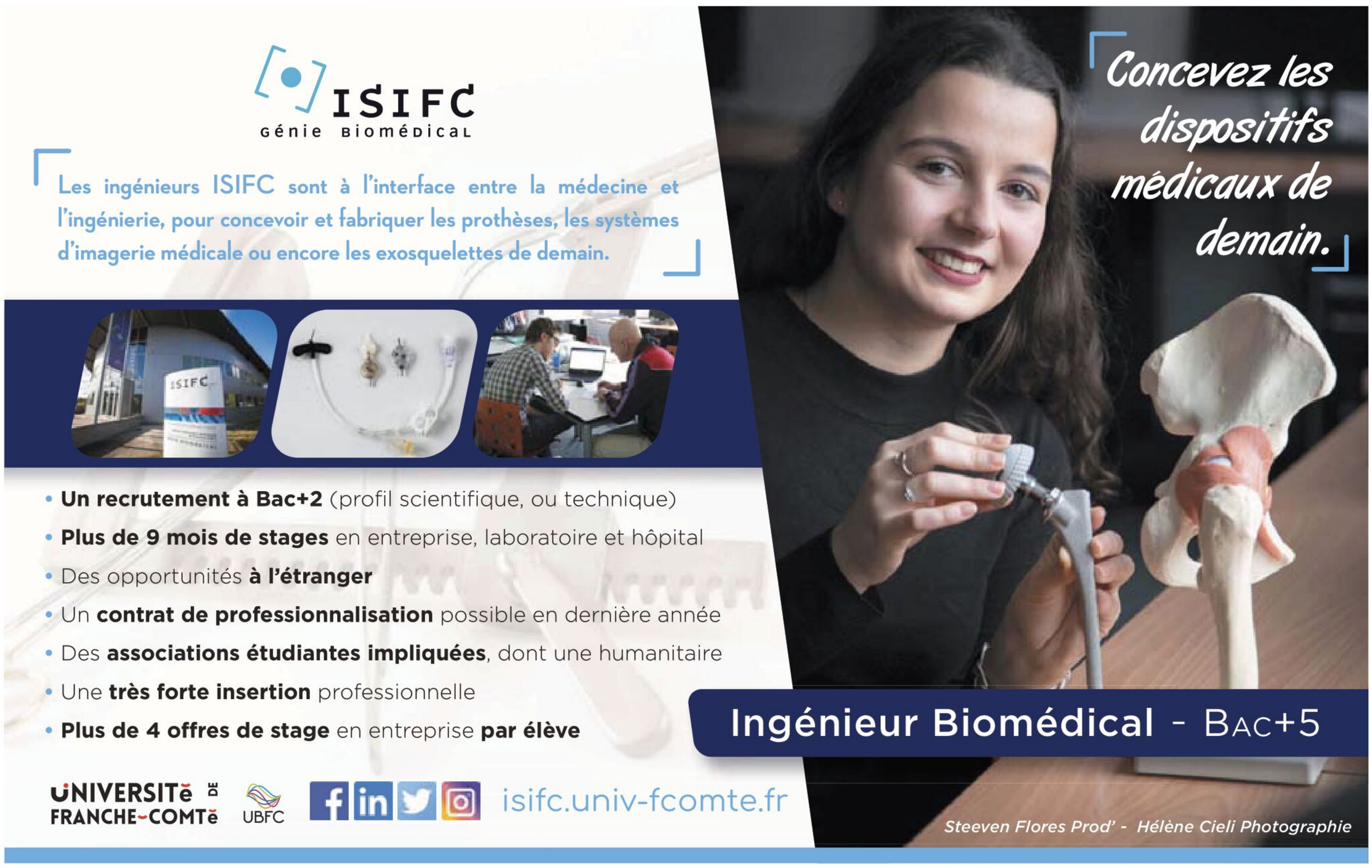
• Tr, Ca, Pe, He, He
Triangle, Carré, Pentagone, Hexagone, Heptagone.
• 60, 90, 108, 120, 128,57
Ce sont les angles au sommet des polygones.
• A5, B4, G5, D5, E7 - Alpha (5 lettres), Bêta (4 lettres), Gamma (5 lettres), Delta (5 lettres), Epsilon (7 lettres)
• Ve, Br, Fr, Ni, Pl - Mois républicains : Vendémiaire, Brumaire, Frimaire, Nivôse, Pluviôse

Mathématiciens & mathématiciens

Mathématicien en unique exemplaire : PASCAL.
Les autres : ERATOSTHÈNE • DESCARTES • PYTHAGORE • THALES • BERNOULLI • FERMAT • GAUSS • EULER • DIOPHANTE • MERSENNE • FIBONACCI.

Auto-référente

1 **3**	6 **4**	**6**	**6**	**8**
2 **2**	7 **3**	**7**	**8**	**9**
3 **4**	8 **3**	**7**	**0**	**1**
4 **2**	9 **1**	**6**	**1**	**0**
5 **0**	0 **3**	**8**	**6**	**7**



À quoi servait l'art pariétal ?

Pendant des dizaines de milliers d'années, les humains de la préhistoire ont orné les parois de grottes et abris-sous-roche. Quelle signification donner à ces créations apparues au paléolithique supérieur ? Éléments de réponse avec la préhistorienne Carole Fritz et l'archéo-anthropologue australien Bruno David.

Dialogue animé par Bernadette Arnaud @narudaaArnaud

Pourquoi les sociétés du paléolithique supérieur se sont-elles soudain mises à orner les parois des grottes et abris-sous-roche ?

Carole Fritz : Le phénomène est multifactoriel. Je suis une fervente partisane de l'interprétation mythologique des dessins du paléolithique supérieur en Europe occidentale. Nous sommes un certain nombre à penser que ce besoin est né d'une maturation sociale et cognitive d'*Homo sapiens* aux alentours de -38 000/-40 000 ans. Les humains ont ressenti la nécessité d'inscrire en images leur mythologie sur les parois rocheuses. Et ces mythes ont organisé le fait social.

Bruno David : Ces représentations sociales, avec leur symbolisme, sont en effet toujours situées dans des cosmologies. Carole parle de mythes, moi, de cosmologie.

AP PHOTO/SIPA

Le premier dessinateur de l'humanité a été *Homo sapiens*, grâce aux mutations de son cerveau et de ses structures sociales (grotte Chauvet, Ardèche).

L'art pariétal est-il le propre d'*Homo sapiens *ou peut-on l'attribuer aussi à Neandertal comme le suggèrent certains spécialistes ?

C. F. : Grâce à l'imagerie médicale 3D, nous pouvons aujourd'hui reconstituer les endocrânes, c'est-à-dire la forme du cerveau et les sillons qu'il comporte à partir d'un crâne fossile. *Sapiens* et Neandertal n'ont pas la même forme de boîte crânienne, ce qui implique des morphologies différentes de l'encéphale. Chez *sapiens*, cela a permis le développement de certaines aires cérébrales liées à la perception du soi, une abstraction plus complexe ainsi qu'une complexification du langage en lien avec des mutations des protéines du gène FOXP2 qui a fait émerger la parole. Or l'expression graphique est intimement associée au langage.

En cumulant l'évolution de l'encéphale, les problèmes de mutation de langage et la complexification de la société, *Homo sapiens* est bien le premier dessinateur de l'humanité. Ce qui ne veut pas dire que Neandertal n'avait pas de mythes ou de conscience de soi, mais sa société et son volume d'abstraction n'étaient pas assez complexes pour qu'il parvienne à réaliser, par exemple, des œuvres telles que celles de la grotte Chauvet.

B. D. : Rappelons aussi que nous n'avons pas encore trouvé, pour l'heure, d'art rupestre dont Neandertal serait l'auteur à -100 000, -80 000, ou -70 000 ans, hormis de petits exemples picturaux qui font débat.

À la grande différence de l'Europe, le continent australien compte une population aborigène qui perpétue un lien étroit avec l'art rupestre. Comment ces sociétés perçoivent-elles les abris peints ?

B. D. : Il existe plus de 500 cultures aborigènes en Australie. Et pour envisager les différentes façons dont elles interagissent avec les sites d'art rupestre, il faut d'abord comprendre ce qu'est le « *dreaming* » [« temps du rêve »]. Il ne s'agit pas d'un calendrier mais d'une perspective cosmologique. Pour les Aborigènes, les

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ETA VENIR - LA RECHERCHE

ancêtres ont créé le monde puis ont transmis aux tribus leurs danses, leurs langues, leurs symboles, leurs représentations... tout ce qui compose une culture. Chaque groupe possédant ses propres ancêtres, cet héritage est différent de l'un à l'autre. Au fur et à mesure de ces transmissions, les ancêtres se métamorphosent dans de la terre, dans les roches... tout en étant toujours vivants.

Ainsi, le « temps du rêve » rassemble passé et présent : quand un individu naît, l'esprit de ses ancêtres l'accompagne et il est identique à celui que l'on retrouve dans les peintures ou dans la terre d'un site. Prenons l'exemple d'un kangourou : il saute, et en sautant il crée les collines. Si ce kangourou est mon ancêtre — comme cela est possible au sein des sociétés aborigènes — cela signifie que ces collines sont aussi mes ancêtres. Admettons ensuite qu'un chasseur coupe la queue du kangourou : le sang répandu devient une ocre rouge qui est aussi mon ancêtre. S'il advient que ce kangourou est peint sur un rocher, ce sera lui-même qui, au cours d'un rêve, en aura donné l'idée au dessinateur. Les ancêtres se confondent avec les individus. C'est le principe du « temps du rêve ».

Le site pariétal serait le point de convergence de ce principe ?

En quelque sorte. Le paysage qui m'entoure est l'héritier de tous les événements qui s'y sont déroulés depuis le temps de mes ancêtres. Mon esprit et celui de mes ancêtres lui donnent vie. Mais le Temps du rêve est aussi défini par ce que les Aborigènes appellent la Loi, transmise là encore par les ancêtres pour se comporter dans la société. Ils utilisent aussi souvent l'expression : « *caring for country* » [prendre soin du pays]. Ainsi, quand des peintures commencent à disparaître de la roche, les Aborigènes expliquent cet effacement par le fait que l'on ne fait plus attention au pays, donc aux ancêtres, et que ces derniers n'ont donc plus de raison de rester. Ils s'en vont...

Bruno David, archéo-anthropologue, à l'université Monash, en Australie. Auteur d'une demi-douzaine d'ouvrages, il collabore à différents projets en Australie, Asie-Pacifique et Amérique.

Carole Fritz, préhistorienne, responsable du Centre de recherche et d'étude pour l'art préhistorique (Creap Émile-Cartailhac, UMR 5608 TRACES (CNRS), à Toulouse directrice scientifique de la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche).

Notre journaliste **Bernadette Arnaud** (en haut).

« Dans les sociétés aborigènes, on sait très bien que les femmes sont aussi des artistes »
Bruno David

Pensez-vous que nous puissions en tirer des enseignements pour l'art paléolithique ?
C. F. : Je mesure ce que nous, anthropologues du paléolithique supérieur, avons perdu comme informations en Occident ! Si nous disposions ne serait-ce que d'un quart de ce qui vient d'être dit concernant les Aborigènes, nous pourrions proposer des scénarios d'organisation sociale, de liens entre les individus. Il existe une permanence de populations en Australie depuis 50 000 ans et même si les Aborigènes d'aujourd'hui sont différents des premiers arrivants, nous savons — grâce à l'anthropologie — que les mythes ne meurent pas, mais se transforment. Ce continent est riche d'un fond commun qui vient de très loin. C'est un modèle très intéressant pour essayer de comprendre l'art paléolithique dans sa durée.

L'art rupestre est un phénomène universel. Or depuis le XIXe siècle, les études se sont beaucoup concentrées sur l'Europe occidentale. N'est-ce pas un biais pour analyser ces œuvres préhistoriques ?
B. D. : En Australie, nous avons eu la chance de bénéficier des façons de penser cosmologiques aborigènes. Du coup, paradoxalement, le symbolisme de l'art rupestre a été presque complètement ignoré par les archéologues et les anthropologues australiens jusqu'aux années 1980. C'est à cette période qu'ont débuté les premières analyses portant essentiellement sur la socialité de l'art préhistorique : comment mieux comprendre le contexte de l'occupation des sites ? Comment les populations communiquent-elles d'un endroit à un autre ? Les anthropologues australiens ne se posent pas la question de sa signification intrinsèque, d'autant que la cosmologie d'un site varie d'une tribu à l'autre. Ainsi, les peuples de la terre d'Arnhem, dans le nord de l'Australie, sont divisés en deux groupes. Toutes les couleurs légères — le blanc ou le jaune, par exemple — appartiennent aux Yirritja, et les couleurs foncées aux Dhuwa. De même pour les choses longues ou courtes. Tout le symbolisme est ainsi divisé. Celui qui peint un kangourou — pour reprendre cet exemple — le fait donc avec le symbolisme qu'il a le droit d'utiliser, en dessinant dans un style particulier dit rayons X. Alors qu'au Kimberley, à quelques centaines de kilomètres de là, la cosmologie est totalement différente !

En Europe, les animaux sont davantage présents que les humains dans les cavités ornées. Comment l'expliquer ?
C. F. : Je pense qu'il existe deux formes d'art. Celui des chasseurs-cueilleurs-collecteurs et celui des agro-pasteurs. Cela a engendré des visions différentes du monde. Au paléolithique supérieur, entre -38 000 et -12 000 ans, l'utilisation du bestiaire, omniprésent, varie très peu (bison, bouquetin, cheval, mammouth, félin, ours, rêne, mégacéros...). Les représentations humaines n'y excèdent pas 5 % du corpus et ce sont majoritairement des corps de femmes ou des éléments de ces corps qui sont représentés. L'interprétation que j'en fais, c'est qu'au paléolithique supérieur, l'humain n'est qu'un animal parmi les autres. Il n'est pas le prédateur principal ayant, au-dessus de lui, les grands carnivores. Et ce lien entre ces chasseurs-cueilleurs et leur environnement est très difficilement compréhensible par certains en Europe.

Des femmes, autant que des hommes, ont-elles pu réaliser ces peintures ?
C. F. : Un article récent publié dans la revue *Sciences Advances* fait état de la découverte de la tombe d'une jeune femme inhumée avec des armes de chasse au Pérou, il y a 9000 ans. Or un certain nombre d'anthropologues estiment que les femmes au paléolithique ne pouvaient pas chasser à cause du sang et des interdits qui y sont associés dans les sociétés primitives comme cela est encore parfois le cas de nos jours. Mais

LE + NUMÉRIQUE
À LIRE : la version intégrale du débat sur notre site **sciencesetavenir.fr**

LEMAIRE STÉPHANE / HEMIS.FR

Les peintures rupestres australiennes renvoient à une cosmologie et donc à un symbolisme qui diffèrent selon les divers groupes aborigènes. (Ici, peintures rupestres du mont Borradail, terre d'Arnhem, Territoire du Nord.)

le regard que nous portons sur ces sociétés évolue et va continuer à le faire. N'oublions pas que la préhistoire a longtemps été étudiée par des hommes, ce qui influe énormément sur l'interprétation des faits. Sans faire de féminisme à outrance, rappelons juste que ces sociétés étaient constituées d'hommes, de femmes et d'enfants ! Et que les chamans de Sibérie sont, aujourd'hui encore, principalement des femmes. Je ne vois donc pas pourquoi les populations du paléolithique supérieur se seraient privées des talents d'une femme si elle peignait très bien !

B. D. : En Australie, cela fait au moins trente ans que l'on ne se pose plus ce genre de questions ! Dans les sociétés aborigènes, on sait très bien que les femmes sont aussi des artistes. ■

BRUNO LÉVY

« Au paléolithique supérieur, l'humain n'est qu'un animal parmi les autres, il n'est pas le prédateur principal »

Carole Fritz

La Recherche
Éthique

PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA *

Irréversibilité de l'ouverture de la science

Ces dernières années, le gouvernement comme les organismes de recherche de notre pays ont largement promu la science dite ouverte, en particulier l'accès libre et gratuit de tous aux publications des travaux résultant de recherches financées sur des fonds publics et l'ouverture des données administratives et scientifiques. En témoignent, entre autres, la loi pour une République numérique promulguée en octobre 2016 et, plus récemment, en 2019, le Plan national pour la science ouverte du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. Comment ne pas se réjouir de telles initiatives qui répondent à l'idéal philanthropique d'une science au service de tous ? Au-delà, l'ouverture des publications et des données permet aussi à tous de contrôler la rigueur de la démarche scientifique, ce qui aide à lutter contre les fraudes et à renforcer la confiance dans les sciences. Rappelons que l'idée n'est pas neuve ; elle apparut au XVII^e siècle, avec les premières revues scientifiques qui faisaient passer d'un savoir tenu secret et réservé à quelques initiés, à une connaissance accessible à tous. Cette idée alla s'amplifiant, connaissant des hauts, mais parfois aussi quelques bas. Ainsi, pour des raisons de sécurité nationale, on mit au secret des scientifiques au cours des conflits majeurs, par exemple lors du projet Manhattan (1939-1946), pendant lequel, confinés à Los Alamos, aux États-Unis, des chercheurs conçurent la première bombe atomique. Aujourd'hui, en dépit de la rivalité entre États, l'ouverture de la science se poursuit. Ainsi, même si l'enjeu politique du vaccin contre le Covid-19 paraît considérable, on continue de publier les principes sur lesquels reposent les différentes pistes de recherches. Bref, pour reprendre l'expression de Paul Claudel, en matière d'ouverture de la science, le pire n'est pas toujours sûr... ■

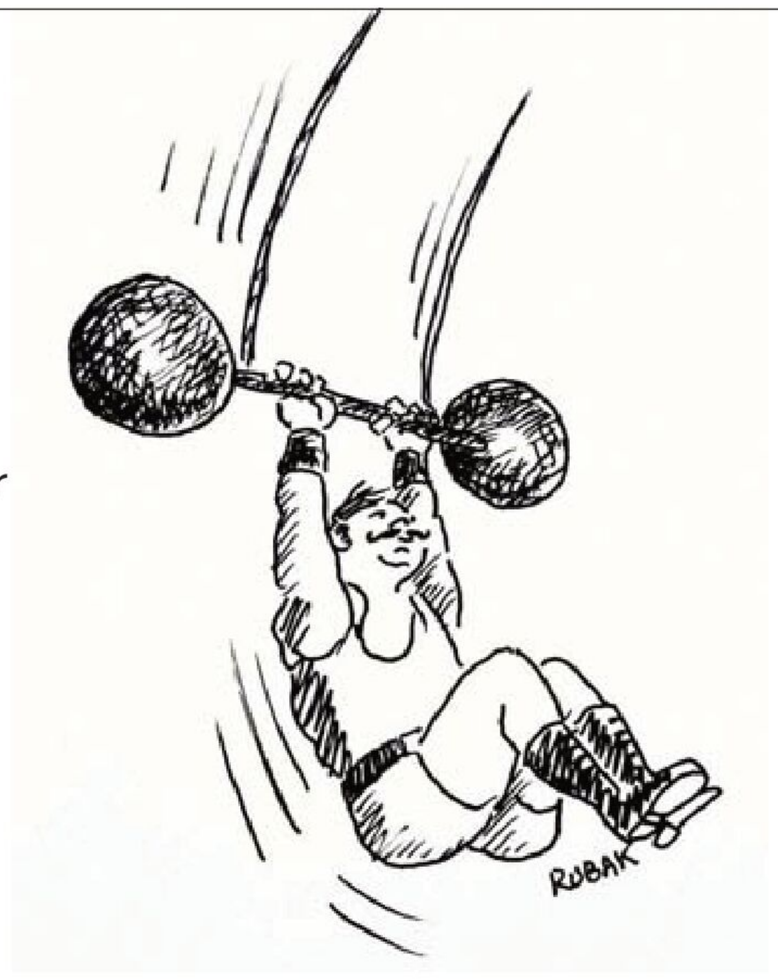
> « Cela permet à tous de contrôler la rigueur de la démarche scientifique »

* Président du comité d'éthique du CNRS, professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS). Dernier ouvrage publié : *Le Mythe de la singularité. Faut-il craindre l'intelligence artificielle ?* Le Seuil, 2017.

PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.



De l'avenir à l'espace

Saurez-vous passer d'AVENIR à ESPACE en 4 mots en n'utilisant que les entrées des dictionnaires courants (ni conjugaisons, ni noms propres, ni pluriels) ? Chaque mot est déduit du précédent en changeant une lettre mais sans respecter obligatoirement l'ordre des lettres.

A	V	E	N	I	R
E	S	P	A	C	E

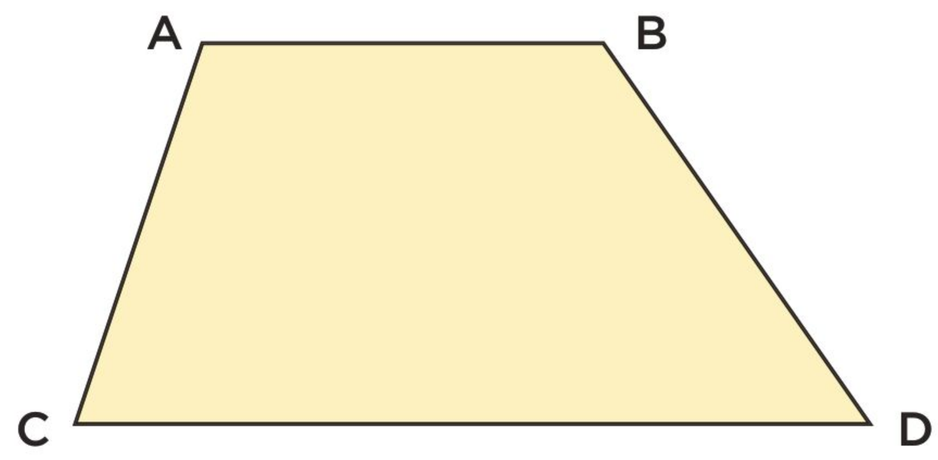
Dodéca-référente ?

Allons plus loin dans les grilles auto-référentes avec le système duodécimal (à base 12). Les majuscules A et B représentent les chiffres de positions 10 et 11. Dans cette grille, les valeurs dans les deux colonnes de gauche indiquent le nombre d'occurrences de chaque chiffre (de 0 à B) présents dans l'ensemble de la grille. Les coins en haut à gauche indiquent de quel chiffre il s'agit. L'emplacement des chiffres dans les colonnes de droite est indifférent. Saurez-vous compléter la grille de façon cohérente ?

0 4	6 1	A	0	B	2
1 4	7 3	A	1	7	A
2 5	8	9			B
3	9 2	A	0	0	
4 2	A	1	B	7	3
5 2	B 5	1		7	B

Trapèze et gravité

Non, le centre de gravité d'un trapèze n'est pas, comme on pourrait l'espérer, situé au point de rencontre des diagonales. Mais où est-il ?



Le magot de Timothée

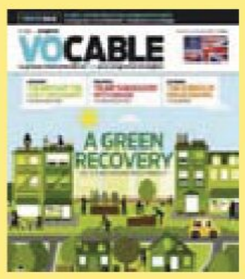
Timothée, qui a 12 ans, dispose d'un petit magot. Il fait un premier achat qui en représente les 2/5. La moitié de ce qui reste passe dans un deuxième achat, et pour un troisième il dépense les 2/3 de ce nouveau reste. Enfin le reliquat est utilisé dans un quatrième et dernier achat de 5 €.
Quelle est la valeur du magot initial et quels sont les montants des achats successifs ?

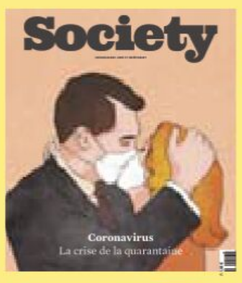
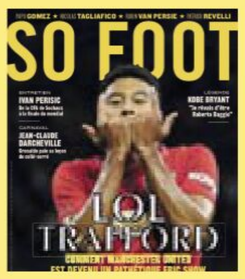
Les séries d'Alphabégore

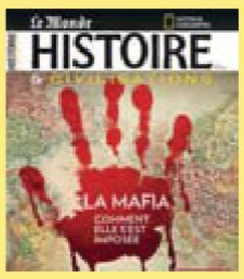
La logique peut être multiforme et se cacher dans les situations les plus simples. Saurez-vous trouver un *item* logiquement intrus dans chacune de ces séries alphabétiques ?

- D I U T
- C F M X
- U D F Q
- C P M W
- H P R T

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues





33 GRANDS TITRES DE PRESSE PRIX IMBATTABLE !

PRIX UNIQUE **39€** l'abonnement

Jusqu'à **-77%** de remise

ruedesétudiants
JE SUIS ÉTUDIANT, JE M'ABONNE

BULLETIN D'ABONNEMENT ÉTUDIANT

A renvoyer complété et accompagné de votre règlement, sous enveloppe non affranchie à :
RUE DES ETUDIANTS - LIBRE REPONSE 82532 - 75803 PARIS CEDEX 08

1. COCHEZ LE OU LES ABONNEMENTS QUE VOUS CHOISISSEZ

ACTUALITÉ INTERNATIONALE

- ☐ **Courrier international** | Hebdomadaire | 26 nos
- ☐ **Time** | Hebdomadaire | 35 nos
- ☐ **Le Monde diplomatique** | Mensuel | 12 nos
- ☐ **Vocable** | Bimensuel | 21 nos
  ☐ Anglais ☐ Allemand ☐ Espagnol (cochez l'édition choisie)

ACTUALITÉ GÉNÉRALE

- ☐ **Le Monde Sélection hebdomadaire** Hebdomadaire | 26 nos
- ☐ **Alternatives Economiques** | Mensuel | 11 nos
- ☐ **L'Obs** | Hebdomadaire | 26 nos
- ☐ **Le 1** | Hebdomadaire | 39 nos
- ☐ **Politis** | Hebdomadaire | 18 nos + web illimité + 1 hors-série en version num
- ☐ **Society** | Bimensuel | 24 nos

CULTURE GÉNÉRALE

- ☐ **L'éléphant** | Trimestriel | 3 nos
- ☐ **Sciences Humaines** | Mensuel | 11 nos
- ☐ **Philosophie magazine** | Mensuel | 8 nos
- ☐ **Zadig** | Trimestriel | 3 nos
- ☐ **Papiers** | Trimestriel | 4 nos

SCIENCES

- ☐ **Sciences et Avenir** | Mensuel | 10 nos + 1 n° double + 4 hors-séries
- ☐ **Science & Vie** | Mensuel | 12 nos + web illimité
- ☐ **Sport & Vie** | Bimestriel | 6 nos + 2 hors-séries

DÉBATS

- ☐ **L'Economie politique** | Trimestriel | 6 nos
- ☐ **Futuribles** | Bimestriel | 3 nos
- ☐ **La Revue des Deux Mondes** | Mensuel | 6 nos
- ☐ **Études** | Mensuel | 6 nos

HISTOIRE ET GÉOGRAPHIE

- ☐ **L'Histoire** | Mensuel | 10 nos + 1 n° double
- ☐ **Histoire & Civilisations** | Mensuel | 11 nos
- ☐ **Population & Avenir** | Bimestriel | 7 nos
- ☐ **La Revue Urbanisme** | Trimestriel | 6 nos

ART ET PASSION

- ☐ **Beaux Arts magazine** | Mensuel | 10 nos
- ☐ **Connaissance des arts** | Mensuel | 8 nos
- ☐ **Ideat** | Bimestriel | 10 nos
- ☐ **Polka** | Trimestriel | 6 nos
- ☐ **Les Inrockuptibles** | Hebdomadaire | 26 nos
- ☐ **Télérama** | Hebdomadaire | 21 nos
- ☐ **So Foot** | Mensuel | 10 nos

2. TOTAL DE MA COMMANDE

Merci de vérifier si vous avez coché la ou les revues souhaitée(s).

☐ 1 abonnement → **39 €** ☐ 3 abonnements → **99 €**
☐ 2 abonnements → **69 €** ☐ autre (30 € par abonnement supplémentaire),
soit _____ abonnements → Total _____ €

3. MES COORDONNÉES - Merci d'écrire en majuscule.

☐ M ☐ Mme Nom _____
Prénom _____
Adresse (France métropolitaine seulement) _____
_____
Code Postal |_|_|_|_|_| Ville _____
Email _____

J'accepte de recevoir par email des offres de Rue des Etudiants ☐ oui ☐ non
J'accepte de recevoir par email des offres des partenaires de Rue des Etudiants ☐ oui ☐ non

4. JE RÈGLE LA SOMME DE

☐ 39€ ☐ 69€ ☐ 99€ ☐ autre montant _____ €
par : ☐ Chèque à l'ordre de Rue des Etudiants
☐ CB ☐ Visa ☐ Mastercard
N° |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|
Date d'expiration |_|_| |_|_|
Cryptogramme (Les 3 chiffres au dos de votre carte) |_|_|_|

Date et signature obligatoires :

En retournant ce formulaire, vous acceptez que Rue des Etudiants, responsable de traitement, utilise vos données pour les besoins de votre commande, de la relation Client et d'actions commerciales. Pour connaître les modalités de traitement de vos données et d'exercice de vos droits (accès, rectification, effacement, opposition, portabilité, limitation des traitements, sort des données après décès), consultez notre politique de confidentialité à l'adresse http://www.ruedesetudiants.com/ ou écrivez à notre DPO – 67/69 avenue Pierre-Mendès France - 75013 Paris ou dpo@groupelemonde.fr.

Je certifie être étudiant(e) ☐ Année d'étude _____
Filière _____

PASCA2

Offre valable jusqu'au 30 juin 2021.

Abonnez-vous encore plus vite sur ruedesetudiants.com

NESPRESSO®

ON LES RECYCLE TOUTES.

La filière de recyclage que nous avons initiée et co-financée permet de recycler non seulement nos capsules en aluminium, mais **l'ensemble des petits emballages métalliques.**

NESPRESSO AGIT POUR LE RECYCLAGE.

Vos solutions de tri sur Nespresso.com/agit

*what else?**

ALLIANCE POUR LE RECYCLAGE DES CAPSULES EN ALUMINIUM
INITIÉE PAR NESPRESSO

* Quoi d'autre ?

NESPRESSO France SAS - SIREN 382 597 821 - RCS PARIS, 7 rue du Colonel Pierre Avia, 75015 Paris.